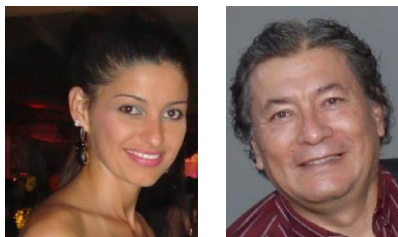


ESTIMATIVA DA DENSIDADE E DUREZA JANKA DE MADEIRAS TROPICAIS POR MEIO DO MÉTODO DE PENETRAÇÃO

ESTIMATE OF THE DENSITY AND JANKA HARDNESS OF TROPICAL WOOD BY MEANS OF METHOD OF PENETRATION

R. C. Alves¹, M. A. Smits¹, E. V. M. Carrasco¹

¹ Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil



RESUMO

Neste trabalho utilizou-se o método não destrutivo de penetração para estimar a densidade aparente e a dureza Janka de madeiras tropicais orientados nas direções, longitudinal, tangencial e radial. Para o ensaio não destrutivo foi utilizado o aparelho Pilodyn 6J. A humidade, densidade aparente e dureza Janka, nas três direções foram determinadas seguindo as prescrições da NBR 7190 (1997). Para a dureza Janka, os valores de coeficientes de determinação foram de 82%, 72% e 42% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. E para densidade aparente, os valores encontrados de R² foram de 76%, 68% e 59% para as mesmas direções.

ABSTRACT

In this article was used non-destructive method of "penetration" to estimate the apparent density and the Janka hardness of tropical woods with the grain oriented in the directions, longitudinal, radial and tangential. For the non-destructive testing device was used Pylodin 6J. The moisture, density and Janka hardness in the three directions of the fibers were determined following the prescriptions of the NBR 7190(1997). For the Janka hardness the values of coefficients of determination were 82%, 72% and 42% for the longitudinal direction, radial and tangential, respectively. As long as for density, the values of R² were 76%, 68% and 59% for the same directions.

Keywords: non-destructive testing, pilodyn, physical property, mechanical property.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de métodos não destrutivos para estimar as propriedades físicas e mecânicas da madeira se dá em decorrência da eficiência dos resultados, associados à rapidez em suas verificações e a não extração do corpo de prova em uma análise de campo. Segundo Launay et al. (2002) são conseguidos também resultados rápidos com baixo custo. Alguns aparelhos que utilizam a

técnica de esclerometria surgiram com a finalidade de determinar a resistência à penetração de materiais. Dentre estes, o aparelho denominado Pilodyn, desenvolvido na Suíça, foi utilizado inicialmente para avaliar o grau de podridão da madeira de postes de linhas de transmissão (Vale et al., 1995). O mesmo autor ainda afirma que a partir deste método é possível estimar a densidade aparente da madeira. O ensaio utilizando o aparelho pilodyn consiste na

penetração de um pino rígido, sob pressão constante, na madeira. O índice de penetração está relacionado com a densidade da madeira (Louzada et al., 2005).

A determinação da densidade da madeira é importante, pois é considerada por muitos autores como a principal característica qualitativa da madeira (Chimello, 1980; Louzada et al., 2005; Goulart et al., 2012). Esta pode ser determinada por métodos diretos e indiretos. Autores como Taylor (1981), Sprague et al. (1983), Moura et al. (1987) há anos já contribuía com estudos para percepção deste método para estimar a densidade da madeira. E seguido por autores como Watt et al. (1996), Oliveira (2001), Yamashita et al. (2007) e Gouvêa et al. (2011).

Muneri e Raymond (2000) destacaram que a densidade da madeira é a característica que mais afeta o índice de penetração (IP) do Pilodyn. Já para Louzada et al. (2005) por sua vez, afirmaram que o IP consegue explicar apenas cerca de 27% da variação da densidade básica. Entretanto, esta conclusão somente é válida quando as correlações entre o IP e a densidade são realizadas para uma espécie de madeira. A utilização de maiores intervalos de densidades acarreta em índices maiores de R^2 , devido à variabilidade da amostra.

São vários os trabalhos que utilizaram este método para avaliar a propriedade de densidade da madeira. Entretanto, são poucos os trabalhos que utilizam a abordagem nas três direções principais da madeira. Gouvêa et al. (2011) utilizaram o ensaio de resistência à penetração para estimar a densidade básica da madeira de seis espécies de *Eucalyptus* e encontraram valores de $R^2= 57\%$. Já Wu et al. (2011) ao realizarem o mesmo estudo para clones de *Eucalyptus* determinaram um coeficiente de determinação igual a 83%, indicando que a densidade básica poderia ser prevista por este método. Ressalta-se que em todos os estudos mencionados, houve a utilização de amostras orientadas em apenas uma direção das fibras. Já o trabalho de Lourenço et al. (2007), utiliza o mesmo método para avaliar a densidade da madeira castanheira (*Bertholletia excelsa*), porém, com os corpos de prova orientados em várias

direções. Entretanto, neste estudo foram utilizadas poucas espécies, ou seja, com um intervalo de densidades pequeno.

Quando se trata da caracterização da madeira nas três direções, longitudinal, tangencial e radial, há poucos trabalhos publicados. E no que diz respeito à determinação de propriedades por meio de ensaios não destrutivos (ENDs) com maior intervalo de densidade, este número se reduz ainda mais. Assim, o objetivo do presente trabalho é estimar a densidade aparente e a dureza Janka de sete madeiras tropicais brasileiras, orientadas nas três direções: longitudinal, tangencial e radial, por meio do método de penetração.

2. METODOLOGIA

Os ensaios realizados no presente trabalho, destrutivos e não destrutivos, foram executados no Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM³), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As madeiras ensaiadas foram angelim pedra (*Hymenobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*).

De cada espécie confeccionou-se sete corpos de prova para cada direção analisada (longitudinal, tangencial e radial). Para cada uma das madeiras foram utilizadas sete vigas de 2,5 m de comprimento e seção transversal de 150x150 mm. As mesmas foram secas ao ar e posteriormente desdobradas em peças menores. Em seguida foram armazenadas para estabilização da humidade, e posteriormente, confeccionadas corpos de prova (CPs) de acordo com a norma NBR 7190 (1997). A partir de cada viga de madeira foram retirados cubos com dimensões de 150 mm, peças de 50x150x150 mm (largura, altura e comprimento) e os restantes foram armazenados para confecção de possíveis réplicas do CPs. Os CPs ensaiados à dureza Janka (147 amostras) foram orientados nas direções radial, tangencial e longitudinal. De cada

viga foram confeccionados dois CPs (uma sendo réplica) para determinação da humidade e da densidade aparente da madeira.

Os procedimentos de ensaio para determinação de características físicas e mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997). As correções da densidade para 12% de humidade foram realizadas utilizando a ASTM D 2395 (1998) e a ISO 3130 (1975).

Para a determinação da resistência à penetração foi utilizado o aparelho Pilodyn 6J, da marca PROCEQ S.A., o qual tem como princípio à penetração de um pino de aço impulsionado por uma mola, que transforma a energia potencial elástica em energia de impacto. A Figura 1 mostra a utilização do aparelho Pilodyn em madeira.



Fig 1- Utilização do equipamento Pilodyn em laboratório.

Este aparelho fornece através de uma escala numérica o valor do índice de penetração (IP), como mostra a Figura 2. Em cada CP foram realizadas duas medições, uma em cada seção transversal, e logo obtido o valor médio dos IPs. Ou seja, totalizando 294 valores de IP.



Fig 2- Escala do aparelho Pilodyn.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na Figura 3 é apresentado um gráfico “boxplot” da densidade aparente a 12% de humidade para cada uma das madeiras utilizadas. Nesta figura verifica-se que os valores médios de densidade aparente das madeiras estão contidos no intervalo de 650 a 1150 kg.m⁻³, portanto, classificadas como madeiras de média a alta densidade.

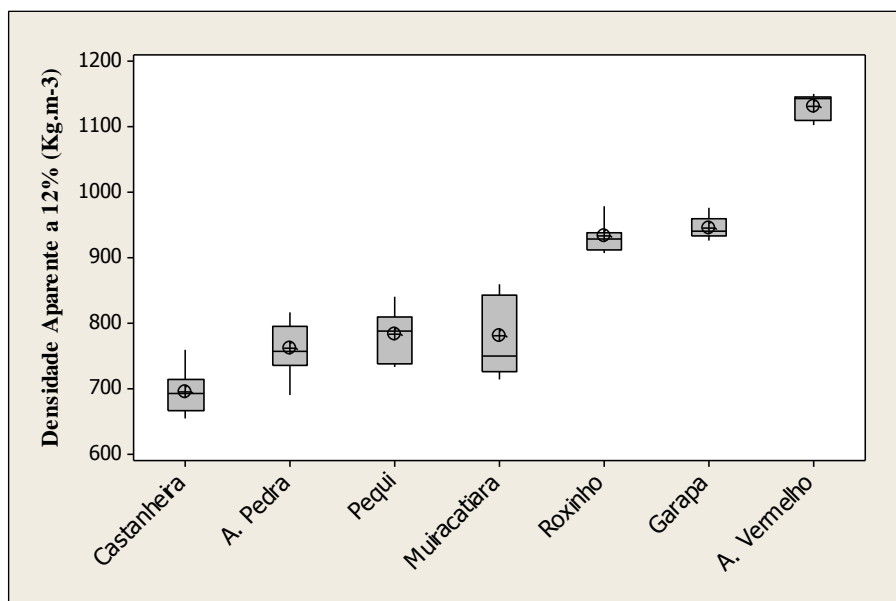


Fig 3- Densidade aparente a 12 % de humidade das madeiras utilizadas.

Na Figura 4 são mostrados os valores de dureza Janka em função da densidade aparente a 12% de humidade para todas as madeiras analisadas.

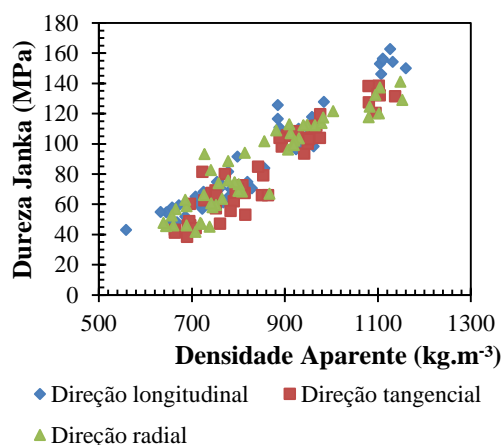


Fig 4- Resultados experimentais de dureza Janka.

Para a dureza Janka, na Tabela 1, verifica-se que na direção longitudinal a madeira de angelim vermelho e roxinho apresentaram os maiores valores médios, não diferindo estatisticamente entre si pelo teste de Tukey. Destaque para a madeira de castanheira que obteve menor valor para esta propriedade mecânica. Nas direções tangencial e radial, novamente a madeira de angelim vermelho e castanheira se destaca-ram com a maior e menor resistência a dureza Janka, respecti-

vamente. Já para as relações das durezas Janka entre as direções de análise, não houve diferenças estatísticas entre as médias das madeiras estudadas, na maioria das vezes.

Na Tabela 2 encontra-se a análise múltipla entre os IPs para cada madeira e a direção de aplicação no CP. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Foi feito também a análise múltipla entre as direções longitudinal, tangencial e radial e verificou-se que as mesmas diferenciaram entre si.

Para a direção longitudinal, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de pequi, muiracatiara e castanheira não se diferenciaram estatisticamente, com os maiores valores de IP. E as madeiras de angelim vermelho e roxinho não se diferenciaram estatisticamente entre si, com os menores valores de IP. Já para a direção tangencial, verifica-se que as madeiras de angelim pedra, castanheira e pequi prevaleceram com maiores valores, estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Enquanto a madeira de angelim vermelho tem menor valor de IP. Mostrando assim a tendência da relação inversa entre a densidade da madeira e o índice de penetração do pino.

Tabela 1. Análise da densidade aparente e dureza Janka das madeiras analisadas

Madeiras	D. A. (Kg.m ⁻³)	D _L (MPa)	D _T (MPa)	D _R (MPa)
Castanheira	696 D (35)	55,29E (4,21)	44,00 D (3,47)	45,70 D (1,85)
A. pedra	761 C (35)	73,17D (10,99)	61,50 C (10,62)	70,64 C (11,38)
Muiracatiara	780 C (42)	61,82DE (13,58)	67,56 C (9,23)	65,85 C (16,08)
Pequi	783 C (38)	70,58 D (7,54)	71,47 C (6,49)	70,55 C (11,67)
Roxinho	933 B (23)	116,36 B (8,24)	107,25 B (6,97)	108,52 B (9,67)
Garapa	946 B (17)	101,47C (4,62)	103,52 B (5,59)	109,09 B (4,68)
A.vermelho	1131 A (20)	154,06 A (5,19)	131,61 A (6,28)	129,00 A (8,71)

A. vermelho= Angelim vermelho; A. pedra= Angelim pedra. DL, DT e DR são dureza Janka longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. * Desvio padrão, em kg.m⁻³ ou MPa.

Tabela 2. Análise da densidade aparente e resistência à penetração (mm)

Madeiras	ρ a 12% Kg/m ³	Direção		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)*	16,0 AB (1,5)	12,6 A (0,53)	11,0 B (0,67)
Angelim pedra	761 C (42)	14,8 B (1,0)	13,1 A (0,75)	12,3 A (0,64)
Muiracatiara	780 C (63)	15,2 AB (2,2)	9,7 C (0,76)	10,9 BC (1,10)
Pequi	783 C (38)	16,9 A (1,0)	12,8 A (0,39)	12,5 A (0,41)
Roxinho	933 B (23)	10,6 CD (0,4)	9,6 C (0,35)	9,9 C (0,63)
Garapa	946 B (17)	12,6 C (0,53)	11,4 B (0,38)	11,6 AB (0,69)
Angelim vermelho	1131 A (20)	9,2 D (0,86)	6,8 D (0,70)	7,6 D (0,38)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em kg.m⁻³ ou mm.

Em relação à direção radial, as madeiras de angelim pedra, garapa e pequi obtiveram maiores valores, e não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, enquanto o menor valor foi encontrado para a madeira de angelim vermelho. Mesmo notando que o IP é inversamente proporcional à densidade aparente a 12% de humidade, pode-se afirmar que a mesma não se mostrou a única característica responsável, mas também a espécie de madeira. Uma vez que, madeiras com altas densidades como pequi obtiveram altos valores de índice de penetração.

A relação entre o Índice de penetração (IP) do pilodyn, densidade aparente a 12% de humidade e dureza Janka encontram-se na figura 5, com a finalidade de apenas expor os resultados.

Na Tabela 3 são mostrados os coeficientes de determinação entre o IP e as propriedades da madeira. Os coeficientes de determinação (R^2), (ver Tabela 3) entre a densidade aparente e a resistência à penetração foram de 76%, 68% e 59% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Resultados bem superiores ao obtido por Gonçalves (2006), que encontrou para quinze árvores do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* valor de R^2 de 34,90%. Callister e England (2010), em

contrapartida, encontraram valores mais altos de R^2 para a mesma característica, em madeira de *E. globulus*, com valores variando de 67 a 90%. Ambos os autores não se preocuparam com a direção em que estavam aplicando o teste. Verifica-se que para as madeiras analisadas, o método de penetração, mostrou ser um equipamento eficiente para inferir a densidade aparente e dureza Janka. Destaca-se que, para tensão dureza Janka na direção radial, o método apresenta baixo coeficiente de determinação. Para dureza Janka e a resistência à penetração, os valores de R^2 foram de 82%, 72% e 42% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Há uma divergência nos valores encontrados, uma vez que, o comportamento da madeira na direção tangencial e radial geralmente é semelhante, e neste caso as mesmas foram extremamente diferentes. Facto este que pode ser explicado por se tratar de um ensaio pontual na superfície da madeira.

4. CONCLUSÕES

Os coeficientes de determinação entre a densidade da madeira e os IPs (índices de penetração) foram de 76%, 68% e 59% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente, mostrando ser um método

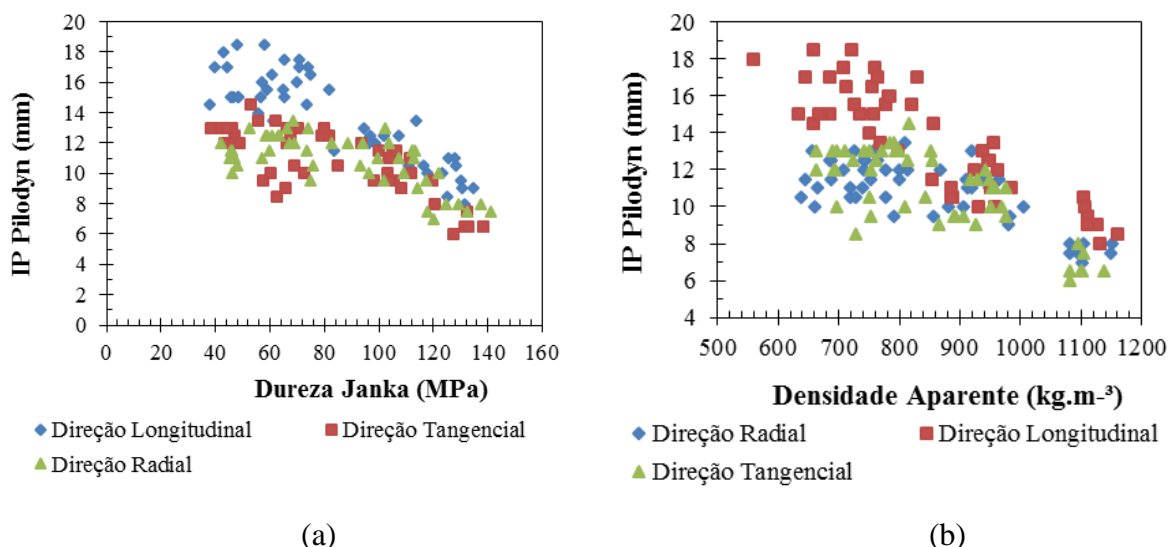


Fig 5- Índice de penetração em função da densidade aparente a 12% de humidade (a) e dureza Janka (b).

Tabela 3. Análise de regressão entre o índice de penetração e propriedades da madeira

	Direção					
	Longitudinal		Tangencial		Radial	
	Eq.	R ² (%)	Eq.	R ² (%)	Eq.	R ² (%)
pa 12%	DA=1469,8 - 45,8 IP	76	DA=1411,4 - 49,7 IP	68	DA=1583,65- 67,5 IP	59
D. J.	DJ=227,7 - 10,0 IP	82	DJ=216,2- 11,8 IP	72	DJ=213,82- 1,7 IP	42

pa 12%= densidade aparente a 12% de humidade. D. J.= dureza Janka. R²= Coeficiente de determinação. Eq.= Equação de determinação. P-valor =0,00 para todas as análises estatísticas acima.

eficiente para estimar esta propriedade. Já para a propriedade mecânica de dureza Janka, o método se mostrou adequado para as direções longitudinal e tangencial, com valores de R² de 82% e 72%, respectivamente. E em contrapartida, não se mostrou adequado para a estimativa direção radial, com valor de R² de 42%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American society for Testing Materials. Standard test method of for specific gravity of wood based materials. ASTM designation D 2395, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

Callister, A. N.; England, N. F. How dense is my blue gum prediction of whole-tree basic density of *Eucalyptus globulus*. New Forests, v. 40, p. 153-164. 2010.

Chimelo, J. Anotações sobre anatomia e identificações de madeiras. São Paulo, IPT. 1980.

Gonçalves, F. G. Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para produtos sólidos. Alegre: Universidade Federal do Espírito Santo, 2006. 196 p. Dissertação Mestrado.

Goulart, S. L. et al. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens* Coville) de bioma cerrado. Cerne, Lavras, v. 18, n. 1, p. 59-66, jan.-mar. 2012.

Gouvêa, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. Revista Árvore, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

- ISO 3130. Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Switzerland. 1975.
- Launay, J. et al. Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using RIGIDIMETER. *Forest Science*, p. 465-469. 2002.
- Lourenço, P. B.; Feio, A. O.; Machado, J. S. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, v. 21.1617-1627. 2007.
- Louzada, J. L. L.; Gaspar, M. J.; Bento, E. M. Uso do pilodyn para a estimativa da densidade da madeira de *Eucalyptus nitens*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Departamento Florestal, Vila Real, Portugal. 6p. 2005.
- Moura, V. P. G.; Barnes, R. D.; Birks, J. S. A comparison of three methods of assessing wood density in provenances of *Eucalyptus camaldulensis* Denh. and other *Eucalyptus* species in Brazil. *Australian Journals of Scientific Research*, Melbourne, n 17, p. 83-90, 1987.
- Muneri, A.; Raymond, C. A. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for basic density, pilodyn penetration and stem diameter in *Eucalyptus globulus*. *Forest Genetics*, v. 7. n. 4, p. 317-328. 2000.
- Oliveira, L. J. R. Uso do Pilodyn para a estimativa da densidade básica e propriedades mecânicas da madeira de eucalipto. Lavras: Universidade Federal de Lavras. 2001. 62p. Dissertação Mestrado.
- Sprague, J.R.; Talbert, J.T.; Jett, J.B.; BRYANT, R.L. Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine. *Forest Science* 29: 696-701. 1983.
- Taylor, F. W. Rapid determination of Southern Pine specific gravity with a pilodyn tester. *Forest Science*, Washington, v.27, n 1, p. 59-61, 1981.
- Vale, A. T. et al. Densidade básica média, em função da profundidade de penetração do pino do “Pilodyn” e da classe diamétrica, e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 80-91.1995.
- Watt, M. S.; Garnett, B. T.; Walker, J. C. F. The use of the pilodyn for assessing outer wood density in New Zealand radiata pine. *For. Prod. J.* v. 46, p. 101-106. 1996.
- Wu, S. J. et al. Estimation of basic density and modulus of elasticity of eucalypt clones in southern China using nondestructive methods. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 23, n. 1, p. 51-56, 2011.
- Yamashita, K.; Okada, N.; Fujiwara, T. Use of the Pilodyn for estimating basic density and its applicability to density-based classifying of *Cryptomeria japonica* green logs. *Mokuzai Gakkaishi*, v. 53, p. 72-81. 20