

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA
AVALIAÇÃO EM CAMPO DA DUREZA DE MADEIRAS PARA
DORMENTE FERROVIÁRIO**

ROBERTO ANTONIO COLENCI

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Abril – 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA
AVALIAÇÃO EM CAMPO DA DUREZA DE MADEIRAS PARA
DORMENTE FERROVIÁRIO**

ROBERTO ANTONIO COLENCI

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Abril – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

C692d Colenci, Roberto Antonio, 1956-
Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo
da dureza de madeiras para dormente ferroviário / Roberto
Antonio Colenci. Botucatu : [s.n.], 2006.
iii, 83 f. : il., color., gráfs, tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006
Orientador: Adriano Wagner Ballarin
Inclui bibliografia.

1. Madeira. 2. Madeiras - Testes. 3. Dormentes de
ferrovias. 4. Equipamento de ferrovia - Indústria. I.
Ballarin, Adriano Wagner. II. Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).
Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO EM
CAMPO DA DUREZA DE MADEIRAS PARA DORMENTE
FERROVIÁRIO.

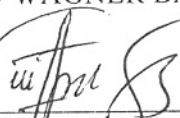
ALUNO: ROBERTO ANTONIO COLENCI

ORIENTADOR: PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN

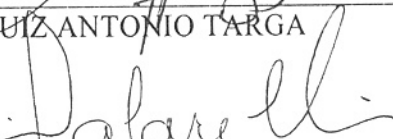
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN



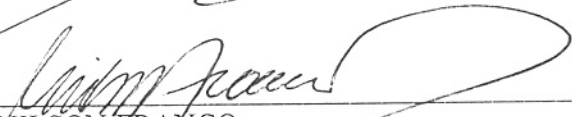
PROF. DR. LUÍZ ANTONIO TARGA



PROF. DR. IVALDO DE DOMENICO VALARELI



PROF. DR. JOÃO ALBERTO BORGES DE ARAUJO



DR. NILSON FRANCO

Data da Realização: 28 de abril de 2006

MENÇÃO ESPECIAL

A minha mãe Esther, exemplo de perseverança e dedicação, pelo incentivo durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça recebida de poder alcançar tão almejada realização.

Ao Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, minha eterna gratidão pelos ensinamentos, dedicação e pela amizade durante a orientação deste trabalho.

A Madeireira São Caetano – Itatinga, a Moretto Madeira de Eucalipto - Botucatu, a Murba Comércio de Madeiras – Botucatu, a Madeireira Mohr – São Paulo, a Duratex S/A – Botucatu e a PREMA Madeiras Tratadas – Rio Claro, pelo fornecimento da madeira para a realização dos ensaios.

Aos amigos Aílton de Lima Lucas e Marcelo Nogueira e Maria Silvia C. Gabriel, pela colaboração nos ensaios e pela amizade.

Ao Dr. Nilson Franco - IPT, pelos ensinamentos e colaboração tão necessária para a execução deste trabalho.

A Prof.^a Dr.^a Carmen Regina Marcati, pela colaboração na identificação botânica das espécies de madeiras.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Padovani, do Departamento de Bioestatística – IBB/UNESP – Botucatu, pela orientação no tratamento estatístico dos dados.

A todos os Professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural e do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela amizade e apoio, indispensáveis para a realização deste trabalho.

À minha esposa Heloisa e aos nossos filhos,
Raquel, Beatriz, Ricardo e Renato, pelo
amor, compreensão, dedicação e estímulo
para a conclusão do presente trabalho.

dedico.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABELAS	IV
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 Um breve histórico das ferrovias no Brasil.....	8
4.2 Dormentes de madeira.....	20
4.3 A madeira de espécies reflorestadas na dormentação	25
4.4 A dureza Janka na madeira.....	29
4.5 A dureza Brinell na madeira.....	35
4.6 Equipamentos portáteis de medição de dureza	39
4.7 Considerações sobre a revisão bibliográfica	43
5. MATERIAL E MÉTODOS	45
5.1 Estudo exploratório	46
5.2 Projeto do equipamento.....	47
5.3 Ensaios de calibração do equipamento.....	49
5.3.1 Material	49
5.3.2 Métodos	53
5.4 Análise dos resultados.....	57
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1 Estudo exploratório	58
6.2 Projeto do equipamento.....	59
6.3 Ensaios de calibração do equipamento.....	64
7. CONCLUSÕES	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS	83
Anexo A – Projeto do durômetro portátil para madeiras	
Anexo B – Resultados gerais dos ensaios realizados	
Anexo C – Tabela de equivalência entre durezas	

LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Matriz de transportes no Brasil.....	14
2	Mapa ferroviário nacional.....	20
3	Dormente prismático.....	21
4	Dormente de duas faces.....	21
5	Dormente roliço.....	21
6	Relação linear entre a dureza paralela às fibras (eixo das ordenadas) e o esforço no limite proporcional na compressão normal às fibras (eixo das abscissas), na condição seca.....	32
7	Relação linear entre a dureza normal às fibras (eixo das ordenadas) e o esforço no limite proporcional na compressão normal às fibras (eixo das abscissas), na condição seca.....	32
8	Correlação entre a dureza paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras – valores para umidade variáveis nos lotes.....	33
9	Correlação entre a dureza normal às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras – valores para umidade variáveis nos lotes.....	34
10	Relação entre os métodos de dureza Brinell e Janka no total das três direções (radial, tangencial e longitudinal).....	38
11	Durômetro King – modelo 134.....	40
12	<i>Laminated Wood Hardness Testing Tool</i>	40
13	Durômetro Shore – modelo ES19-HP.....	41
14	Durômetro portátil com leitura eletrônica digital – Modelo TH130- <i>Integrated Hardness Tester</i>	42
15	Durômetro Janka – IPT.....	42
16	Durômetro portátil para madeiras – aspectos gerais do equipamento (esquerda) e forma de utilização na madeira para avaliação da sua dureza (direita).....	47
17	Lupa graduada marca Holtermann modelo LH 20/10X.....	48
18	Chapa de alumínio utilizada para ensaios de repetitividade.....	49
19	Seqüência de desdobro das toras até o material para produção dos corpos-de-prova.....	52
20	Desdobro da tora em vigas e estoque de caibros de (6x6x120)cm ³	53

		Página
21	Regiões dos caibros onde foram realizados os ensaios mecânicos.....	54
22	Aspectos gerais do ensaio de dureza Janka normal às fibras (esquerda) e do ensaio de compressão paralela às fibras (direita).....	55
23	Endentação no ensaio de dureza Brinell (esquerda) e calota esférica obtida (direita).....	55
24	Vista geral do Durômetro portátil para madeiras (esquerda) e dos detalhes da ponteira (direita).....	60
25	Esquema geral de endentação da ponteira na madeira, com a utilização de carbono para ressaltar o contorno da calota esférica endentada	61
26	Regressão linear entre os valores das durezas Brinell e Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.....	72
27	Regressão linear entre os valores das durezas E1 e E2 e a dureza Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.....	73
28	Regressão linear entre os valores das durezas E3 e E4 e a dureza Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.....	74

LISTA DE TABELAS

		Página
1	Classes de madeira para dormentes	23
2	Classes de resistência da madeira	24
3	Propriedades características físico-mecânicas de madeiras de uso na dormentação.....	28
4	Valores médios de algumas propriedades de grupamentos de madeira..	29
5	Diferentes métodos de determinação de dureza em materiais, tipos de instrumentos de penetração e medidas avaliadas.....	30
6	Valores de Dureza em função da relação P/D^2 no ensaio de dureza Brinell (HB).....	36
7	Carga de endentação e campo de aplicação para diferentes diâmetros da esfera de endentação	37
8	Dados principais dos lotes de madeira empregados	51
9	Dados gerais obtidos nos ensaios-piloto de dureza Brinell	58
10	Resultados gerais do ensaio de repetitividade do durômetro portátil para madeiras	63
11	Intervalo de confiança dos coeficientes de variação das durezas Brinell e E1 a E4.....	63
12	Valores representativos das grandezas mensuradas	65 e 66
13	Resultados do teste de comparação de médias das grandezas densidade, umidade, dureza Janka, dureza Brinell e resistência à compressão entre os lotes estudados.....	67
14	Resultados do teste de comparação de médias das durezas E1 a E4 entre os lotes estudados.....	68
15	Resultados do teste de comparação de médias das grandezas densidade, umidade, dureza Janka, dureza Brinell e resistência à compressão entre os grupos, obtidos pela associação de lotes	70
16	Resultados do teste de comparação de médias das durezas E1 a E4 entre os grupos, obtidos pela associação de lotes	71
17	Resultados da classificação dos corpos-de-prova em classes, a partir de valores característicos da dureza Janka, inferidos pela relação de regressão com a dureza E2.....	75
18	Resultados da classificação dos corpos-de-prova em classes, a partir de valores característicos da dureza Janka, inferidos pela relação de regressão com a dureza E3.....	76

1 RESUMO

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e no controle de qualidade de diversos materiais.

No caso particular da madeira, dentre as diversas propriedades mecânicas empregadas como ferramentas para avaliação da sua qualidade e de seu potencial tecnológico, tem destaque a dureza Janka, que avalia a relação entre uma força de penetração superficial de uma pequena esfera de aço na madeira e a endentação promovida por essa esfera. Constitui-se em ensaios simples, rápido, e com boas correlações com a resistência à compressão paralela às fibras da madeira, referência maior na classificação estrutural deste material.

Mais recentemente, trabalhos internacionais reportaram o uso da dureza Brinell para avaliação de madeiras. Além das vantagens já reportadas para a dureza Janka, a dureza Brinell traria a facilidade de realização dos ensaios em condições de campo, sobretudo pela menor magnitude dos esforços envolvidos na cravação do endentador na superfície do material. Dando continuidade a estudos já desenvolvidos, este trabalho teve como objetivo estudar critérios ou práticas, aplicáveis no campo e em exemplares individuais, para a qualificação mecânica de algumas espécies de madeira com a finalidade de classificação, e aprovação ou reprovação de lotes de dormentes de madeira para uso ferroviário. Os estudos iniciais conduziram ao projeto e desenvolvimento de equipamento

para avaliação em campo da dureza de madeiras – Durômetro portátil para madeiras embasado, no geral, na metodologia Brinell com mensuração dos diâmetros da calota endentada no material sob análise.

Os ensaios de teste funcional e de calibração do equipamento foram conduzidos utilizando-se 16 lotes de madeiras de reflorestamentos e nativas, dentre elas *E.citriodora*, *E. tereticornis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. grandis*, *Goupia glabra* (Cupiúba) e *Bagassa guianenses* (Tatajuba), variando-se, além das espécies, as procedências. Cada lote foi amostrado com 12 exemplares. Os ensaios de calibração, conduzidos com as madeiras na umidade de recebimento consistiram de testes laboratoriais de referência (compressão paralela, densidade e dureza Janka), seguindo-se metodologias de normas técnicas da ABNT e testes com uso do equipamento desenvolvido. A análise dos resultados foi encaminhada com o estabelecimento de correlações de regressão entre a dureza avaliada pelo equipamento e as outras propriedades de interesse para a madeira.

Os resultados obtidos revelaram a grande funcionalidade e baixo custo do equipamento, quando comparado às alternativas comercialmente disponíveis. O equipamento revelou boa repetitividade de leituras e, para a energia de endentação de 200kgf.mm, boa correlação com os resultados de dureza Janka e bom desempenho no processo de classificação de madeiras, o que o abonam como instrumento para avaliação em campo da dureza de madeiras.

Palavras-chave: madeira, dormentes, dureza Janka, dureza Brinell, equipamento portátil.

2 SUMMARY

The mechanical property called hardness is largely used in material specifications, in mechanical and metallurgical studies and research and in the quality control of several kinds of materials.

Specifically for timber, among the several mechanical properties used as tools for its quality control and technological potential, Janka hardness, which evaluate the relation between a superficial penetration force of a small steel sphere in wood and the indentation produced by such sphere, are highlighted. It is constituted by simple, quick and easily performed test, with good correlations with the compression parallel to grain strength, a high reference in structural classification for this material.

More recently, international studies have reported the use of Brinell hardness for timber assessment. Besides the advantages previously mentioned for Janka hardness, the Brinell one would make it easier to perform the tests in field conditions, especially for its lower magnitude in terms of the involved loads. Continuing studies already developed with such property for timber, this work had the objective of studying criteria or practices applicable on field and in individual wood elements, for the mechanical qualification of some timber species towards its classification, and approval or failing of timber sleeper lots for rail usage. The initial studies led to the project and development of an equipment for timber hardness field evaluation - portable *Hardometer* for timber.

The functional and calibration test of the equipment were carried out using 16 native and exotic timber lots, among there *E.citriodora*, *E. tereticornis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. grandis*, *Goupia glabra* (Cupiúba) and *Bagassa guianenses* (Tatajuba), with variation of origins beyond species. Each lot had 12 specimens. The calibration tests, performed with timber on its moisture above the FSP (fiber saturation point), consisted of reference laboratory tests: compression parallel to grain, density and Janka hardness, (following ABNT Brazilian codes) and tests using the developed equipment. The result analysis was carried out with the regression correlations between the hardness evaluated by the equipment and other properties of interest for timber.

The results revealed the great functionality, usefulness and low cost of the equipment, when compared to the commercially available alternatives. The equipment also revealed good repetition of measurements and, for energy indentation of 200 kgf.mm, good linear correlation with Janka hardness and good performance on wood classification procedure, that approve it as portable instrument for field evaluation of wood hardness .

Keywords: timber, sleepers, Janka hardness, Brinell hardness, portable equipment.

3 INTRODUÇÃO

Muita coisa ocorreu com o transporte ferroviário brasileiro desde que o empreendedor Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, recebeu a primeira concessão para construir e explorar um trecho ferroviário no país, a Imperial Companhia de Navegação e Estrada de Ferro Petrópolis, que, inaugurada em 1854, ia dessa cidade ao Porto Mauá, na cidade do Rio de Janeiro.

Pelas estradas de ferro afora, o café era escoado e os recém chegados imigrantes, transportados até as regiões produtoras do grão. Às suas margens, novas cidades nasceram e se desenvolveram – Botucatu, Araçatuba, Sorocaba, Presidente Prudente, entre outras.

O crescimento ferroviário se manteve até os anos 30, do século passado, quando o Brasil chegou a possuir mais de 36000 quilômetros de vias permanentes instaladas. Mas a decadência do comércio de café no mercado internacional e a posterior aposta do país no transporte rodoviário começaram a minar o setor, que amargou um longo período de estagnação e decadência.

As ferrovias só teriam novas perspectivas a partir de 1996, com a desestatização do setor, quando o Governo Federal licitou 28500 quilômetros de estradas de ferro à iniciativa privada.

A grande maioria das Companhias de Estradas de Ferro brasileiras utiliza em larga escala dormentes de madeira e a malha ferroviária brasileira, com cerca de

30000 quilômetros de extensão emprega dormentes de madeira em mais de 80% de sua via permanente; a CVRD - Companhia Vale do Rio Doce, operadora da Estrada de Ferro Carajás (cerca de 900 km de extensão) utiliza quase que exclusivamente dormentes de madeira.

Na fase de implantação dessas ferrovias havia grande disponibilidade de madeiras nativas de uso consagrado para esse fim. Com a drástica alteração dessa realidade, essas madeiras atingiram preços proibitivos, exigindo novas alternativas.

Assim, os programas de reposição de dormentes nas vias permanentes têm envolvido altas cifras, o que exige soluções imediatas para redução de custo. Conta-se com o fato adicional de que a maioria das empresas ferroviárias brasileiras enfrenta uma situação mais difícil do que aquela vivenciada pela Estrada de Ferro Carajás, com déficits acumulados que se agigantam ano a ano.

A alternativa, a curto e médio prazos, tem sido a viabilização do uso de madeiras de reflorestamento para a confecção de dormentes, aos moldes da sistemática já adotada em outros países como África do Sul e Argentina, dentre outros.

O código normativo que especificava e balizava essa aplicação da madeira - NBR 7511 - Dormentes de madeira, (ABNT, 1982) - encontra-se desatualizado e incompleto para dar suporte técnico a essa nova realidade.

Na maioria dos processos para especificação de dormentes, os aspectos técnicos envolvidos têm sido ditados por documentos internos das próprias empresas ferroviárias, mais abrangentes, completos e atuais, em substituição a NBR 7511.

A necessidade da completa revisão e ampliação do atual código normativo já foi evidenciada em trabalho de Ballarin (1996) e desde essa data está a cargo de comissão de estudos CE 6:01.001 – Dormentes e lastro ferroviário - vinculada ao CB - 6 - Comitê Brasileiro Metrô - Ferroviário, da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Paralelamente, a Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu, através de seu Departamento de Engenharia Rural, vem trabalhando desde 1992 com a análise teórica dimensional de dormentes prismáticos de madeira de reflorestamento, utilizando-se do método computacional dos elementos finitos e considerando as diversas variáveis envolvidas nesse problema e mais recentemente com a utilização da dureza como propriedade mecânica para qualificação de dormentes.

Na continuidade dessa linha de pesquisa, este trabalho tem como

objetivo principal desenvolver e calibrar equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras utilizadas na produção de dormentes ferroviários.

O trabalho tem, ainda, os seguintes objetivos específicos:

- determinar a relação entre a dureza avaliada pelo aparelho e a dureza Janka
- determinar a relação entre a dureza Brinell e a dureza Janka para madeiras para uso como dormente ferroviário.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 - Um breve histórico das ferrovias no Brasil

Somente na segunda metade do século XIX, seriam criadas, no Brasil, as condições de demanda econômica e social que iriam possibilitar o aparecimento das ferrovias aqui, fundamentalmente ligadas ao escoamento da produção de café e de outros produtos agrícolas do Vale de Paraíba, para exportação através do Porto do Rio de Janeiro.

Segundo Ribeiro *et al.* (1996), acompanhar a expansão da malha ferroviária brasileira, pelo menos até os anos 50 do século XX, é percorrer os próprios caminhos da história econômica do País.

Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, recebeu concessão do Governo Imperial para construção e exploração de uma linha férrea de 14,5 quilômetros, entre a Praia da Estrela, fundo da Baía de Guanabara, e Raiz da Serra de Petrópolis. Em 1º de maio de 1854, o Imperador D. Pedro II inaugurou esta primeira via férrea brasileira, percorrendo o trajeto na locomotiva “Baronesa”, em cerca de 23 minutos, atingido uma velocidade máxima de 63 km/h, um assombro para a época (BRINA, 1979 e SETTI, 2000).

A partir de então, por meio de iniciativas não coordenadas, foram implantadas as seguintes extensões aproximadas de ferrovias no Brasil, por períodos de anos (BRINA, 1979):

- 1854 a 1890 – 15.000km

- 1900 a 1930 – 17.000km
- 1930 a 1953 – 5.000km

Destaque-se a Companhia Estrada de Ferro D. Pedro II, implantada originalmente em 1858, ligando a Corte Imperial, em São Cristóvão, a Queimados, tendo sido duplicada neste trecho em 1898, é a mesma ligação até hoje existente, integrante da malha ferroviária metropolitana do Rio de Janeiro, nos dias atuais em operação pela SuperVia. Em 1889, após o advento da República, mudou de nome para Estrada de Ferro Central do Brasil, e foi prolongado sua linha tronco, incorporando o Ramal de São Paulo, interligando-se à Leopoldina Railway e avançando, pelo outro extremo, para Belo Horizonte com a construção do Ramal de Paraopeba. A Serra do Mar constituiu o grande obstáculo a ser vencido pelos construtores; muitos técnicos estrangeiros participaram desta expansão da malha. Foram abertos diversos túneis e implantados um sem número de viadutos e pontes; foi levado a efeito um volume de serviços de terraplenagem, com escavações em rocha e solo, possivelmente, sem precedentes na América do Sul (TELLES, 1984 e 1993).

Ainda no período do Império, em 1884, foi construída a menor ferrovia brasileira, a Estrada de Ferro Corcovado (ESFECO), no Rio de Janeiro, de bitola métrica, extensão de pouco mais de 3.800 m e empregando sistema cremalheira para vencer a elevação no topo da qual, anos depois, seria erguida a estátua do Cristo Redentor. Em 1910, esta seria também a primeira ferrovia eletrificada do País. Já a ferrovia brasileira que atinge a maior altitude, 1.742 m acima do nível do mar, é a Estrada de Ferro Campos do Jordão (EFCJ), de propriedade do Governo do Estado de São Paulo. Construída mais como finalidade humanitária, para atender questões de saúde daqueles que necessitavam da altitude e clima de Campos do Jordão, a ferrovia liga a cidade de Pindamonhangaba, no ramal de São Paulo da Estrada de Ferro Central do Brasil, a Campos do Jordão (SETTI, 2000).

É de interesse registrarem-se breves palavras a respeito da epopéia da construção da Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, com cerca de 366 km, tendo sido despendidos cerca de cinco anos para a sua construção, com início em 1907 e inauguração em 1912. A construção da ferrovia fazia parte do Tratado de Petrópolis, firmado entre Brasil e Bolívia, que garantiu ao Brasil a incorporação do Acre ao seu território. Tratava-se de ligar Santo Antonio, às margens do Rio Madeira, até Guajará-Mirim, no Rio Mamoré, permitindo-se à Bolívia o acesso ao Oceano Atlântico.

Já no início do século XX, com condução do Engenheiro Paulo de Frontin, foi duplicada a Estrada de Ferro Central do Brasil no trecho da Serra do Mar, utilizando-se, então, técnicas mais modernas de engenharia. Nos anos 20, as exportações de minério oriundo de Minas Gerais e escoado pelo Porto do Rio de Janeiro, batiam recordes. Em 1920, havia cinco trens de passageiros por dia, em cada sentido, ligando Rio de Janeiro a São Paulo (TELLES, 1993).

A maior parte dos financiamentos para a construção destas primeiras estradas de ferro originava-se de capital privado, com concessões do Governo Federal e garantias de taxas atraentes de retorno sobre o capital investido.

Logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, estudos da Comissão Brasil – Estados Unidos para o desenvolvimento do Brasil indicavam a ferrovia como de grande importância estratégica. Em 1953, a malha ferroviária brasileira totalizava cerca de 37.000 km. Por razões diversas, ligadas a ciclos econômicos, várias destas estradas vinham apresentando prejuízos, entrando em processos falimentares. Visando a se evitar o alastramento de uma crise econômica mais abrangente, o Governo Federal formulou um projeto de unificar o conjunto das ferrovias em uma malha integrada. Criou, em 1957, a Rede Ferroviária Federal para disciplinar a operação ferroviária no País, padronizando seus equipamentos, serviços e métodos de trabalho. A nova Empresa dispunha de uma malha de cerca de 30.000 km, que é, até hoje, aproximadamente, a extensão da rede ferroviária brasileira, com todas as erradicações e construções de novas ferrovias ocorridas desde então. A Rede Ferroviária Federal incorporou as seguintes ferrovias, maiores e menores (FONTELLES e FRÓES, 2000 e SIMEFRE, 2000):

- Estrada de Ferro Madeira-Mamoré
- Estrada de Ferro Bragança
- Estrada de Ferro São Luís – Teresina
- Estrada de Ferro Central do Piauí
- Rede de Viação Cearense – Resultado da fusão de duas estradas de ferro, a Baturité e Sobral, cujos contratos de arrendamento foram anulados em 1915 e somavam 1.587 km.
- Estrada de Ferro Mossoró-Souza
- Estrada de Ferro Sampaio Correia

- Viação Férrea Federal Leste Brasileiro – Criada em 1935, com a encampação, pela União, de cinco ferrovias com 2.545 km de extensão ao longo dos estados da Bahia e Sergipe.
- Estrada de Ferro Bahia a Minas
- Estrada de Ferro Goiás
- Rede Ferroviária do Nordeste (RFN) – Resultante da encampação do Great Western Railway, contava com 2.655 km quando foi incorporada à Rede Ferroviária Federal.
- Viação Férrea Centro-Oeste
- Estrada de Ferro Leopoldina – Inaugurada em 1877, com linhas nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, foi incorporada à Rede Ferroviária Federal com um total de 3.057 km de extensão.
- Estrada de Ferro Central do Brasil – Incorporada à Rede Ferroviária Federal com 3.729 km.
- Rede Mineira de Viação – Criada em 1931, resultou da fusão da Rede de Viação Sul Mineira com a Estrada de Ferro Paracatu e outras linhas. Foi transformada em autarquia em 1953, com 3.989 km de linhas.
- Estrada de Ferro Santos a Jundiá
- Estrada de Ferro Noroeste do Brasil – Em 1971, a União encampou duas estradas de ferro no eixo Bauru (SP) – Corumbá (MS), com 1.764 km de extensão.
- Rede de Viação Paraná – Santa Catarina (RVPS) – Resultado da junção de diversas linhas, desde a pioneira Estrada de Ferro Paraná, concedida a particulares em 1872. Passou ao controle da União em 1940, e foi incorporada à Rede Ferroviária Federal com 2.666 km de linhas.
- Estrada de Ferro Dona Tereza Cristina
- Estrada de Ferro Santa Catarina
- Viação Férrea do Rio Grande do Sul (VIFER) – Seu primeiro trecho foi inaugurado em 1871, entre Porto Alegre e Novo Hamburgo. Em 1920, a União encampou todas as ferrovias existentes no Rio Grande do Sul. Em 1959, era constituída por 3.735 km de linhas.

Ficou fora da Rede Ferroviária Federal uma parte da malha ferroviária do Estado de São Paulo. Desde 1868, tinham sido criadas as seguintes ferrovias que não

foram englobadas no processo de incorporação pela Rede Ferroviária Federal (FONTELLES e FRÓES, 2000):

- Companhia Paulista de Estradas de Ferro
- Estrada de Ferro Sorocabana
- Companhia Mogiana de Estradas de Ferro
- Estrada de Ferro Araraquarense
- Estrada de Ferro São Paulo a Minas

O Governo Federal já detinha o controle acionário destas companhias e, em 1971, integrou esta malha fora da Rede Ferroviária Federal, formando a empresa estatal Ferrovias Paulista S.A. – FEPASA, de propriedade do Governo do Estado de São Paulo (FONTELLES e FRÓES, 2000).

Uma das ferrovias mais importantes do País e que também não foi integrada à administração unificada da Rede Ferroviária Federal é a Estrada de Ferro Vitória a Minas. Tendo sido dada a partida na sua implantação no início do século XX, veio a se consolidar em importância com a eclosão da Segunda Guerra Mundial, com o crescimento vertiginoso da demanda de minério de ferro no mundo, quando o Brasil passou a ser grande exportador a partir das jazidas do vale do Rio Doce, em Minas Gerais, exploradas pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Atualmente, cerca de 40% das cargas transportadas por ferrovia no Brasil trafegam sobre os trilhos da Estrada de Ferro Vitória a Minas (SIMEFRE, 2000). A mesma CVRD, nos anos 80, construiu e opera a Estrada de Ferro Carajás, para escoamento da produção mineral gerada pela exploração das jazidas da Serra de Carajás, no interior do Pará. A ferrovia liga a região da província mineira ao Porto de São Luís, no Maranhão (SETTI, 2000). É, possivelmente, a ferrovia com maior índice de produtividade do mundo (SIMEFRE, 2000).

A Ferrovia do Aço, ligando Belo Horizonte a Volta Redonda, atravessando a topografia acidentada da Serra da Mantiqueira, é uma via férrea sem similar no mundo, pelo gigantismo da obra com grandes extensões de túneis e viadutos. A sua implantação se iniciou nos anos 70, tendo sido concluída nos anos 90. Foi a última realização grandiosa no setor ferroviário brasileiro.

Pela Conferência Internacional de Berna, em 1907, foi estabelecida a denominada “bitola internacional” de 1.435 m, similar à largura entre rodas das diligências e carruagens da época dos primeiros trechos ferroviários ingleses (4’81/2’’), visando a se aproveitar os caminhos carroçáveis existentes como leitos ferroviários. Na realidade, estes caminhos eram oriundos de estradas abertas pelo império romano quando de suas conquistas e suas larguras eram, adequadas para a passagem das bigas, em geral puxadas por dois cavalos em paralelo, o que determinava uma largura mínima para trafegarem.

As empresas inglesas, primeiras fabricantes de veículos ferroviários, eram as mesmas que construíram as carroças e diligências antes das ferrovias e, por essa razão, utilizavam os mesmos ferramentais para fabricação, em particular dos eixos dos truques ferroviários.

Mas, por motivações diversas, nem todos os países adotaram a “bitola internacional”, como por exemplo (BRINA, 1979):

• Itália	1,445m	África do Sul	1,065m
• França	1,440m	Rússia	1,523m
• Espanha	1,674m	Austrália	1,524-1,676m
• Portugal	1,665m	Argentina e Chile	1,676m

No Brasil, a “bitola padrão” é a chamada “bitola larga”, de 1,60 m, embora, paradoxalmente, não seja a predominante. A de maior extensão na malha brasileira é a “bitola estreita”, de 1,00 m. Durante anos, no final do século XIX, a escolha da bitola para as novas construções e prolongamentos das ferrovias existentes gerou grandes polêmicas. A diversidade de bitolas no País constitui-se num erro histórico e afeta até hoje o sistema ferroviário brasileiro, prejudicando sua capacidade de transporte a longas distâncias. Nos Estados Unidos, para se exemplificar, em que a bitola é a internacional, a distância média de transporte ferroviário é superior a 1.000 km, enquanto no Brasil é da ordem de 400 km. Apresenta-se, a seguir, uma relação das bitolas existentes no País, acompanhadas das respectivas extensões aproximadas (BRINA, 1979):

• bitola de 1,60m	5.600 km
• bitola de 1,435m (E.F. Amapá)	200 km
• bitola de 1,00m	22.800 km
• bitola de 0,76m	13 km

- bitola mista (1,00m + 1,60m) 716 km
- bitola de 0,60m (E.F. Perus – Pirapora) 30 km

Os custos globais de movimentação de cargas (produtos ou matérias-primas) e pessoas no Brasil são dos mais altos do mundo, no geral. Este fato está intimamente ligado à sua matriz de transportes. O MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2001), apresenta estatísticas das matrizes de transportes no Brasil (Figura 1). A distorção é ainda mais manifesta, quando se sabe que os 20,86% correspondentes ao transporte total de carga por ferrovias no Brasil incluem mais de 12% referentes à parcela de minério de ferro, obrigatoriamente ferroviária, resultando em pouco expressivos 8,86% para o restante de carga geral.

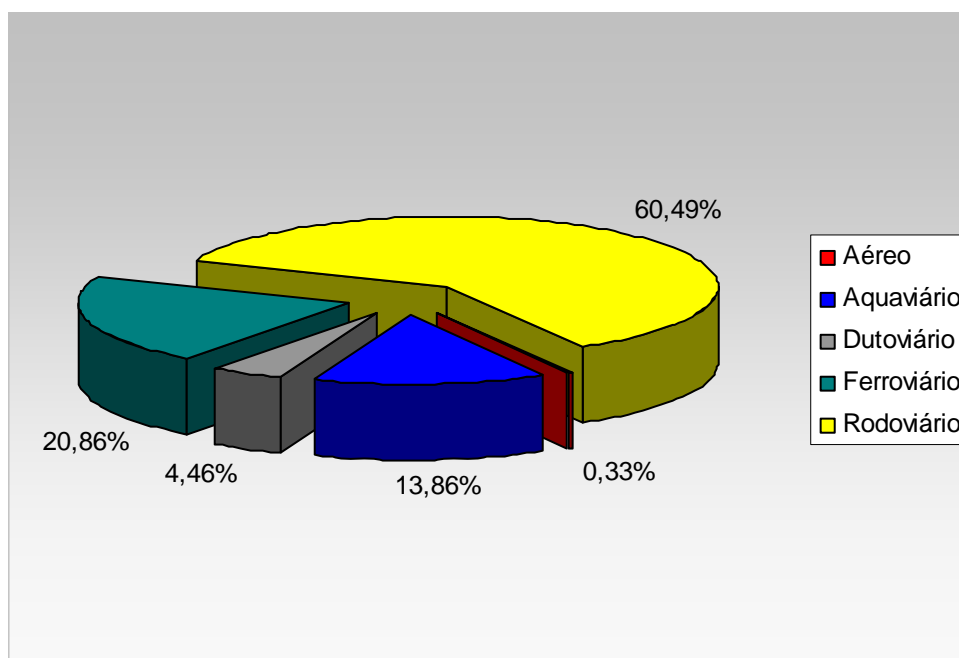


Figura 1 – Matriz de transportes no Brasil

Fonte: Ministério dos Transportes (2001)

Os meios de transporte ferroviário e rodoviário não são conflitantes; resguardadas suas especificidades, eles são complementares. O transporte ferroviário é, tipicamente, de cargas pesadas conduzidas a longas distâncias; quanto mais pesadas as cargas e mais longos os percursos, mais baixos os custos unitários; são os corredores troncos. O transporte rodoviário, por seu lado, é, predominantemente, mais curto e para cargas mais

leves, integrando de forma radial o sistema de transporte. No Brasil, entretanto, estes princípios básicos de transporte não são respeitados.

A Associação de Engenheiros da Central do Brasil - AECB (1991) apresenta o custo global ferroviário para o transporte de 1 tonelada quilômetro útil (TKU) como igual a US\$ 0,04 e o correspondente rodoviário, igual a US\$ 0,14. Sem se pretender aprofundar a discussão sobre Política de Transportes, é evidente no Brasil a distorção da matriz de transporte.

Em 1992, o Governo Federal incluiu a RFFSA no Programa Nacional de Desestatização. Naquele momento, 98% da malha eram operadas por três Empresas públicas, duas delas controladas pelo Governo Federal, a RFFSA e a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), esta última com duas ferrovias separadas, a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), na Região Sudeste, e a Estrada de Ferro Carajás (EFC), na Região Norte. A terceira Empresa pública era a Ferrovia Paulista S.A. (FEPASA). Os 2% restantes da malha, com operação privada eram constituídos pela Estrada de Ferro Campos do Jordão (SP), com 47 km de extensão; Estrada de Ferro Amapá, com 194 km; Estrada de Ferro Perus-Pirapora, com 30 km; Estrada de Ferro Votorantim, com 15 km; Estrada de Ferro Jari, com 68 km; e Estrada de Ferro Trombetas, com 35 km; todas isoladas e não conectadas à malha (CASTRO e LAMY, 1994).

Atualmente, o sistema ferroviário brasileiro acha-se quase que totalmente concedido (praticamente, as exceções são os Metrô e transporte urbano de passageiros em alguns estados), constituindo-se nas empresas a seguir apresentadas, juntamente com as respectivas extensões e outras informações institucionais (CASTRO e LAMY, 1994; MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2001; SIMEFRE, 2000; e FONTELLES e FRÓES, 2000), (Figura 2):

- **CFN** – Companhia Ferroviária do Nordeste S.A., com 4.535 km e início de operação privada em 1998. A composição societária é constituída por: Taquari Participações, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN e Companhia Vale do Rio Doce – CVRD.
- **FCA** - Ferrovia Centro-Atlântico S.A., com 7.080 km e início de operação privada em 1996. A composição societária é constituída por: Mineração Tacumã, Interfêrrea, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Tupinambaraba, Railtex Internacional, Gruçai, Ralph Partners e Judori.

- **NOVOESTE** – Ferrovia Novoeste S.A., com 1.622 km de extensão, iniciou operação privada em 1996. A composição societária é constituída por: Noel Brazil, Brazil Rail Partners e Western Rail.
- **FERROPASA** – resultado da junção, em 1998, da NOVOESTE à FERRONORTE, estando prevista, para esta última, uma extensão total de 5.228km, dos quais 290km estão em operação. A composição societária é constituída por: PREVI, FUNCEF, Brazil Rail Partners, CONSTRAN, LAIF V, BNDESPAR, BRP FERRONORTE e Banco BRADESCO.
- **ALL** – América Latina Logística. Já operava concessões ferroviárias na Argentina, quando, a partir de 1999, incorporou a FSA – Ferrovia Sul-Atlântico S.A., com 6.586km e início de operação privada em 1997. A composição societária é constituída por: Varbra, Railtex Internacional, Ralph Partners, Judori, Interfêrrea, Brazilian Equity Invest., Brasil Private Equity e Brazilian Equities.
- **MRS** – Minas – Rio – São Paulo Logística S.A., com 1.674 km e início de operação privada em 1996. A composição societária é constituída por: Minerações Brasileiras Reunidas – MBR, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, GERDAU, FERTECO, Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais – Usiminas, Ultrafêrtil, Celato e ABS Empreendimentos Imobiliários.
- **FERROBAN** – Ferrovias Bandeirantes S.A., com 4.186 km e início de operação privada em 1999. A composição societária é constituída por: PREVI, FUNCEF, União de Comércio e Participações, Chase Latin America, CAPMELISSA Participações e Logística Bandeirantes.
- **FTC** – Ferrovia Tereza Cristina S.A., com 164 km de extensão e início de operação em 1997. A composição societária é constituída por: Gemon, Banco Interfinance, MPE e Santa Lúcia Agro Indústria.
- **EFC** e **EFVM** – Estrada de Ferro Carajás e Estrada de Ferro Vitória a Minas, respectivamente com 1.056 km (linha singela) e 898 km (linha dupla), e início de operação em 1997, pela CVRD privatizada.
- **FERROESTE** – Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A., com 248 km e início de operação em 1997. Há previsão de expansão. Trata-se de uma sociedade de economia mista, com controle acionário do Governo Estadual do Paraná.

- **EFT** – Estrada de Ferro Trombetas, operada pela Vale do Rio Doce Alumínio – ALUNAVE, controlada da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, com 35 km de extensão.
- **EFJ** – Estrada de Ferro Jarí, operada pela JARÍ Celulose S.A., com 68 km de extensão.
- **EFA** – Estrada de Ferro Amapá, operada pela Empresa Indústria e Minério de Minério S.A. – ICOMI, com 194 km de extensão.
- **FNS** – Ferrovia Norte-Sul, construída, a construir e operada pela VALEC S.A., empresa pública vinculada ao Ministério dos Transportes, opera atualmente trecho de 226 km, com previsão de construção de 1.638 km.
- **SUPERVIA**, com 550 km da malha ferroviária metropolitana do Rio de Janeiro e início de operação concedida em 1998. A composição societária é constituída por: Banco PROSPER, Banco PACTUAL e Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles – CAF.
- **METRÔ – DF** – Trata-se de uma empresa pública, operando, a partir de 2001, 40 km de linha.
- **METRÔ – RJ** – Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro. Concedida a operação à OPPORTRANS em 1997. A composição societária é constituída por: Banco Opportunity, COMERTRANS e VALIA. Possui 42 km de linha. Sua malha encontra-se em expansão.
- **METRÔ – SP** – Companhia do Metropolitano de São Paulo. Trata-se de empresa estatal ligada do Governo do Estado de São Paulo e que opera 56 km de linha. Sua malha encontra-se em expansão.
- **FLUMITRENS** – Companhia Fluminense de Trens Urbanos. Trata-se de empresa estatal ligada ao Governo do Estado do Rio de Janeiro e que opera 71 km de linha. Há previsão de expansão de sua malha.
- **CPTM** – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. Trata-se de empresa estatal ligada ao Governo do Estado de São Paulo desde 1991, tendo absorvido cerca de 270 km de linhas de subúrbio da Ferrovia Paulista S.A. – FEPASA e da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU/SP. Sua malha deverá se interligar à do Metrô – SP.

- **GTU/JP** – Gerência de Trens Urbanos de João Pessoa. Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 40 km de linha.
- **GTU/MAC** – Gerência de Trens Urbanos de Maceió. Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 32 km de linha.
- **GTU/NATAL** – Gerência de Trens Urbanos de Natal. Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 56 km de linha.
- **STU/BH** – Superintendência de Trens Urbanos de Belo Horizonte (Trem Metropolitano de Belo Horizonte – TMBH). Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 21 km de linha.
- **METRÔFOR – STU/FOR** – Superintendência de Trens Urbanos de Fortaleza. Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 46 km de linha. Sua malha encontra-se em expansão.
- **METRÔREC – STU/REC** – Superintendência de Trens Urbanos de Recife. Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho operado possui 53 km de linha. Sua malha encontra-se em expansão.
- **STU/SAL** – Superintendência de Trens Urbanos de Salvador (Metrô de Salvador). Trata-se de um órgão da Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU – empresa estatal ligada à União e que se encontra em processo de estadualização. O trecho possui 14 km de linha. Sua malha encontra-se em expansão.
- **TRENSURB** – Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre. Trata-se de empresa de economia mista que tem como acionistas o Governo Federal (96,1%, o Governo do Estado do Rio Grande do Sul (3,0%) e a Prefeitura de Porto Alegre (0,9%), e que opera 31,5 km de linha. Sua malha deverá ser expandida.

Das concessões outorgadas pela União às empresas privadas, e que se referem aos trechos ferroviários de carga mais importantes do País, torna-se ilustrativo apresentarem-se alguns aspectos contratuais;

- a Concessionária fica responsável pela operação dos trens e pela manutenção de todo o sistema;
- a duração da Concessão é por 30 anos, prorrogáveis por mais até 30 anos;
- a Concessionária tem direito de construir e explorar prolongamentos da via, com prévia aprovação da União;
- foram fixadas metas de produção e redução do número de acidentes;
- foram fixadas tarifas de referência (limites máximos) para o transporte, obrigando-se a União a reajustá-las periodicamente;
- a Concessionária tem o dever de garantir o tráfego mútuo e, na impossibilidade, o direito de passagem a outras operadoras ferroviárias;
- todos os passivos existentes até a data da concessão permaneceram sob a responsabilidade da RFFSA;
- a Concessionária escolheu os empregados e os bens da RFFSA que lhe convieram;
- não foram fixados valores para investimentos da Concessionária, ficando subentendido que seu montante seria consequência do alcance das metas;
- a Concessionária, com prévia autorização da União, poderá explorar fontes alternativas de receita, pagando uma comissão de 3 a 10% à União;
- na extinção da Concessão, todos os bens reversíveis, direitos e privilégios, retornarão à União, mediante indenizações preestabelecidas.

Tendo em vista o grau de liberdade operacional e de manutenção que as Concessionárias dispõem, e na medida em que os bens retornarão à União decorrido o prazo da Concessão, impõe-se a necessidade de acompanhamento pelo Poder Público da forma pela qual as metas contratuais são atingidas. O alcance das metas pelas Concessionárias pode se dar, degradando a malha ferroviária de forma irreversível, quando do fim da Concessão.

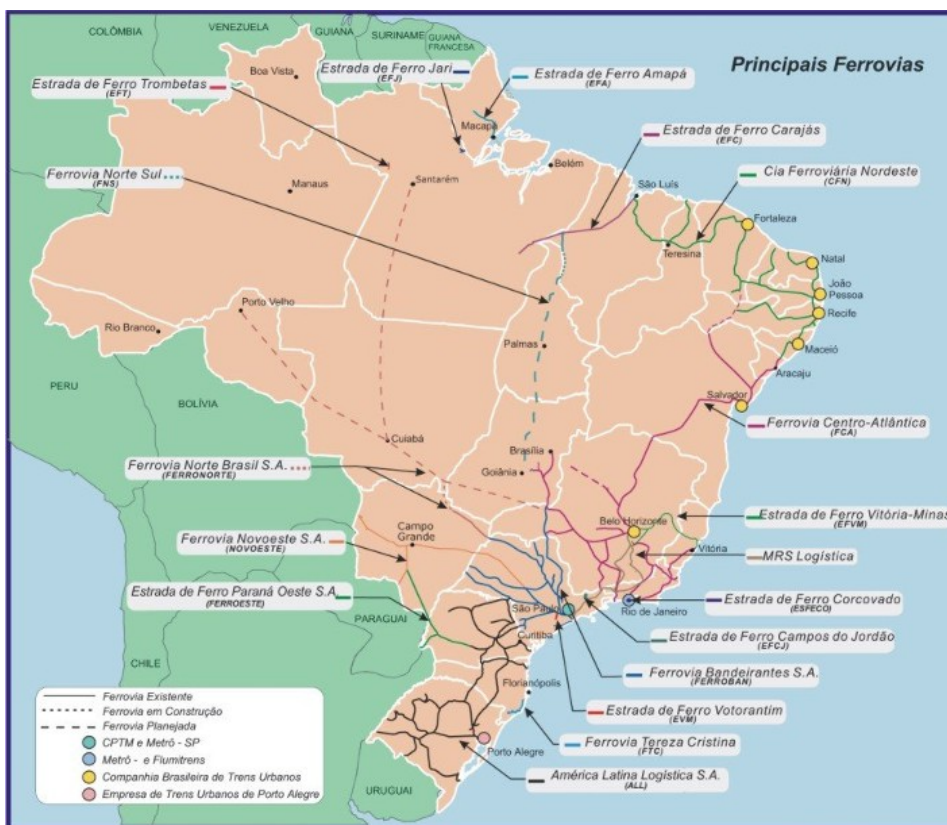


Figura 2 – Mapa Ferroviário Nacional

Fonte: Ministério dos Transportes

4.2 Dormentes de madeira

Na produção de dormentes de madeira, a forma geométrica mais comumente adotada é a prismática (Figura 3), com as dimensões nominais de 16 cm (altura), 22 cm (largura) e 200 cm (comprimento) para bitola métrica. Para bitola larga (entre eixos dos trilhos afastados 160 cm) as dimensões dos dormentes passam normalmente a 17 cm, 24 cm e 280 cm, respectivamente para altura, largura e comprimento. Alternativamente, são usados também dormentes de duas faces (Figura 4) e dormentes roliços (Figura 5).



Figura 3–Dormente prismático

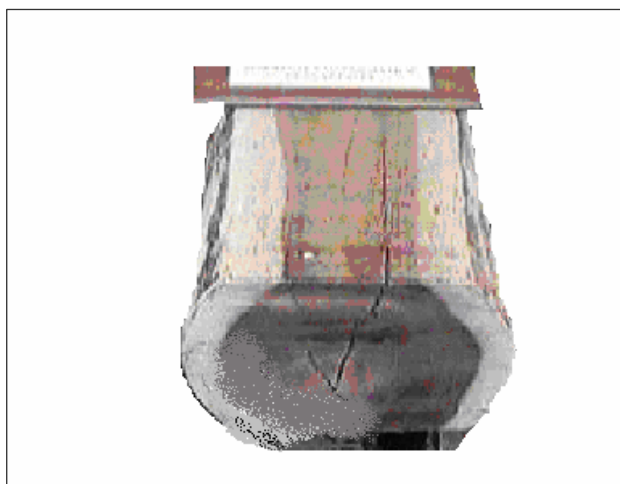


Figura 4 – Dormente de duas faces

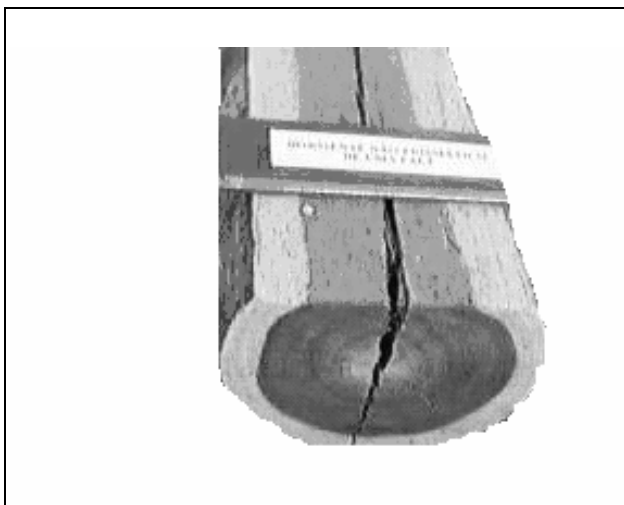


Figura 5 – Dormente roliço

Fonte: Museu do Eucalipto Navarro de Andrade

Schramm (1977) comenta que a escolha do tipo (espécie) de madeira para a confecção de dormentes não deve ser baseada exclusivamente na análise de suas propriedades mecânicas. Deve-se considerar ainda a disponibilidade das reservas florestais da região e os condicionantes econômicos.

A antiga NBR 7511 - Dormentes de madeira (ABNT, 1982) agrupava as madeiras para dormentes, de forma simplista, em dois grupos: “madeira branca” e “madeira de lei”. Evidentemente, esse texto normativo não contemplava práticas mais específicas e detalhadas, que, já naquela ocasião, faziam parte da rotina de trabalho de diversas empresas ferroviárias. Como exemplo pode ser citado o documento técnico “EVA – 15 - Justificativa para elaboração de normas para dormentes de madeira”, elaborado pelo corpo técnico da antiga RFFSA – Rede Ferroviária Federal S.A., em 1979, que já contemplava a classificação da madeira para esse uso em 3 classes distintas:

- 1ª classe:** madeiras de grande resistência físico - mecânica, podendo ser utilizadas, inclusive, nas linhas principais de tráfego pesado;
- 2ª classe:** madeiras de resistência físico - mecânica mediana, passíveis de aproveitamento nos desvios e pátios das linhas de tráfego pesado e nas linhas principais de tráfego médio;
- 3ª classe:** madeiras para utilização, de preferência, nas linhas de tráfego leve e muito leve.

O primeiro projeto inicial de revisão do texto normativo de 1982, de março de 1989, elaborado pela CE 6:02-02-080 do CB-6 – Comitê Brasileiro do equipamento e material ferroviário, passou a incorporar critérios mais bem definidos na classificação das madeiras para dormentes. Pela fixação de valores mínimos de diversas propriedades físico-mecânicas as madeiras eram classificadas em três classes distintas: 1ª classe, 2ª classe e 3ª classe, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de madeira para dormentes¹

Propriedade	Simb.	Unidade	Valores Mínimos		
			1ª classe	2ª classe	3ª classe
Massa espec. (15% de umidade)	Me	g/cm ³	0,75	0,60	0,50
dureza Janka	D	kgf/cm ²	500	400	300
resistência ao cisalhamento	C	kgf/cm ²	100	80	70
resistência à tração normal	T	kgf/cm ²	75	50	40
resistência ao fendilhamento	F	kgf/cm ²	9	7	5
Grau de coesão	I _c	-	3	2	1,5
D+C+T+F ²	-	-	850	650	500

Fonte: ABNT (1989)

Todas as propriedades referidas, com exceção da massa específica, eram mensuradas com a madeira na condição verde (umidade acima do ponto de saturação das fibras). O grau de coesão era avaliado pela equação:

$$I_c = \frac{T \cdot C_r}{Me \cdot C_t \cdot C_v}, \text{ onde:} \quad (1)$$

- I_c - grau de coesão
- T - resistência da madeira à tração normal às fibras, em kgf/cm²;
- Me - massa específica (densidade) da madeira, em g/cm³;
- C_r - contração radial da madeira, em porcentagem;
- C_t - contração tangencial da madeira, em porcentagem;
- C_v - contração volumétrica total da madeira, em porcentagem.

À parte dos documentos normativos e outros elaborados pelos comitês técnicos da ABNT, as empresas ferroviárias sempre elaboraram especificações próprias que, com base em experimentos efetuados nas próprias linhas, definiam nominalmente as espécies de madeira de melhor desempenho e, por essa razão, preferidas. Como exemplo, cita-se o documento “Especificação para aquisição de dormentes de madeira 2,00m” (CVRD, s.d.), que listava madeiras como: ipê (*Tabebuia sp*), aroeira (*Astronium urundeuva*), sucupira amarela

¹ Foram mantidas a terminologia e simbologia originais do documento.

² O somatório (D+C+T+F) não resulta da soma aritmética dos valores respectivos apresentados na tabela.

(*Ferreirea spectabilis*); canela preta (*Nectandra mollis*), jatobá roxo (*Hymenaea stilbocarpa*), gonçalo-alves (*Astronium fraxinifolium*), angico preto (*Piptadenia macrocarpa*), peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), etc.

Em praticamente todos os documentos com essas características identifica-se a preferência (quando não a exclusividade) por madeiras de 1ª classe.

As práticas normativas e mesmo empresariais para a escolha de madeiras para dormentes são, dessa forma, distintas daquelas usadas para a classificação de madeiras para estruturas, preconizadas pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

A NBR 7190 (1997) preconiza que a classificação estrutural das madeiras em classes de resistência seja feita com as bases apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de resistência da madeira

CONÍFERAS					
CLASSE	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{bas} (kg/m³)	ρ_{apar} (kg/m³)
C 20	20	4	3500	400	500
C 25	25	5	8500	450	550
C 30	30	6	14500	500	600
DICOTILEDÔNEAS					
CLASSE	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{bas} (kg/m³)	ρ_{apar} (kg/m³)
C 20	20	4	9500	400	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	100

Onde:

$f_{c0,k}$	- resistência característica à compressão paralela às fibras
$f_{v,k}$	- resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
$E_{c0,m}$	- módulo de elasticidade longitudinal médio à comp. paralela
ρ_{bas}	- densidade básica da madeira
ρ_{apar}	- densidade aparente da madeira

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

De sua análise verifica-se que a classe de resistência é definida pela resistência característica da madeira à compressão paralela às fibras, determinada por meio de ensaios mecânicos em corpos-de-prova prismáticos, com seção quadrada de 5cm x 5cm e comprimento de 15 cm.

4.3 A madeira de espécies reflorestadas na dormentação

Ballarin (1996) citou, a exemplo de outros autores que a madeira do gênero eucalipto é, dentre as provenientes do reflorestamento, a mais indicada para uso na produção de dormentes para ferrovias. De fato, neste sentido, várias são as constatações científicas e práticas, estas últimas levadas a cabo notadamente por empresas ferroviárias.

Sales e Lahr (1991), no estudo de cinco espécies de eucalipto, constataram que as suas propriedades apresentam valores médios que evidenciam a possibilidade de emprego na construção de estruturas para quaisquer finalidades.

Nogueira e Lahr (1992), em estudo mais abrangente com dezesseis espécies de eucalipto, acusaram a potencialidade de uso de algumas espécies para a dormentação de ferrovias.

As experiências internacionais (em especial as australianas) com diversas espécies de eucalipto são descritas por muitos pesquisadores.

Niederauer (1982) comentou que a utilização do eucalipto como dormente prismático de há muito é feita, não só na Austrália, onde quase todos os dormentes são dessa essência, como também em Portugal, França, Estados Unidos, Inglaterra, Argentina e Uruguai.

Ainda segundo Niederauer (1982), na Austrália, algumas variedades do gênero botânico *Eucalyptus* como, por exemplo, *E. marginata* e *E. diversicolor* são consideradas inigualáveis para uso na dormentação, por conta de sua vida útil comprovada se situar em torno de 30 anos, sem nenhum tratamento preservativo. É por essa razão que as ferrovias inglesas se encontram entre as maiores importadoras de dormentes de eucalipto da Austrália. No Brasil essas duas espécies não possuem disponibilidade comercial.

Tuset e Taibo (1987) informaram que no Estado de Victória (Austrália) o eucalipto *camaldulensis* (*E. camaldulensis*) é a madeira mais utilizada como dormente. Ainda segundo Tuset & Taibo (1987) um dos usos freqüentes do eucalipto

globulus (*E. globulus*) é na confecção de dormentes. Este tipo de uso alcança cifras expressivas na Tasmânia.

As experiências nacionais com o uso de eucalipto iniciaram-se no final do século passado.

Hellmeister (1978) afirmou que o eucalipto citriodora (*E. citriodora*), originário da Austrália, foi introduzido no Brasil por volta de 1850. A partir de 1903, tem sido largamente cultivado em áreas de florestamento e reflorestamento, devido ao fato de possuir excelentes características físicas, mecânicas e crescimento muito rápido, mesmo em terras consideradas pobres para a agricultura convencional.

Os primeiros dormentes de eucalipto utilizados no Brasil em larga escala, segundo Niederauer (1982), foram empregados na construção da estrada de ferro Madeira - Mamoré, em 1907. Na ocasião, a firma May, Jacky & Randolph, de Nova York, importou 80.000 dormentes de eucalipto da Austrália, para construir o leito daquela ferrovia.

Ainda segundo o mesmo autor, a FEPASA, atual Brasil Ferrovias, empregou dormentes prismáticos de eucalipto em suas linhas desde 1969. Somente a Companhia Mogiana de Estradas de Ferro, uma das ferrovias integrantes da Ex-FEPASA, tinha assentado na via permanente até 1971, cerca de 700.000 dormentes prismáticos de eucalipto.

Na antiga RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A., o emprego desses dormentes restringiu-se às experiências das Regionais Rio de Janeiro (SR-3), atual MRS Logística e Porto Alegre (SR-6), hoje sob concessão a América Latina Logística - ALL, totalizando cerca de 600.000 peças instaladas.

No tocante ao rendimento de dormentes no desdobro da madeira de eucalipto, Niederauer (1982), referindo-se aos dormentes para bitola métrica, comentou que uma árvore de eucalipto com 12 a 15 anos de idade rende, em média, de 5 a 6 unidades, sendo 3 unidades de "duas faces", mais 2 a 3 unidades "roliças".

Segundo o pesquisador, a escolha da espécie de eucalipto é condicionante da forma da seção transversal do dormente e do rendimento no desdobro. Citando exemplo do reflorestamento proposta para a RFFSA - Rede Ferroviária Federal S. A., Niederauer (1982) comentou que um hectare plantado com eucalipto de variedade selecionada

pode produzir, em cada 20 anos, 2400 dormentes, sendo 840 roliços, 1554 de duas faces e somente 6 prismáticos.

A título de comparação, exclusivamente, Andrade (1961) comenta que na derrubada dos cerradões paulistas — onde há maior incidência de madeiras apropriadas para dormentes — a média de dormentes extraídos por hectare foi de 400 unidades.

Andrade (1961), referindo-se ao eucalipto globulus (*E. globulus*), comenta o uso na Companhia Paulista de dormentes preparados com árvores de 20 anos de idade.

Assim, utilizada com diferentes formatos, a madeira de eucalipto pode ser vista, em muitos casos, como uma solução na luta contra o grave problema ferroviário de abastecimento de dormentes para as vias permanentes.

Contudo, algumas experiências realizadas — especialmente no Brasil — sem a devida consideração das técnicas de corte, secagem e seleção de espécies mais recomendadas acabaram por criar uma falsa impressão de que a madeira de eucalipto é imprestável para tal uso.

Ballarin (1999) comenta as principais práticas para a obtenção de dormentes de eucalipto com a minimização de defeitos buscando minimizar o problema de fendilhamento de topo dos dormentes, através da escolha adequada de espécies que apresentam menor tendência à ocorrência do fenômeno, notadamente para confecção de dormentes prismáticos e duas faces, Niederauer (1982) sugere as espécies *E. citriodora*, *E. maculata*, *E. paniculata* e *E. siderophloia* como aquelas com baixa tendência de ocorrência do fenômeno. Com leve e moderada tendência ao fendilhamento o autor cita *E. tereticornis*, *E. rostrata* e *E. botryoides*.

Nogueira e Lahr (1992) afirmam que das espécies de eucalipto, as mais apropriadas para utilização como dormentes são *E. microcorys*, *E. maculata*, *E. citriodora*, *E. punctata* e *E. tereticornis*.

Niederauer (1982) afirma que das propriedades físico-mecânicas, a densidade e a dureza Janka são propriedades muito importantes no caso dos dormentes. Os dormentes, solicitados por cargas elevadas pelos patins dos trilhos, estão sujeitos a desgaste

nas zonas de entalhe e fixação. Além disso, estão em permanente contato com elementos metálicos, por um lado, e pedras do lastro, por outro.

As Tabelas 3 e 4, já apresentadas em Ballarin (1999), comparam propriedades físico-mecânicas de algumas espécies de Eucalipto e madeiras “de lei” e “madeiras brancas” consagradas na produção de dormentes. Por elas, evidencia-se a proximidade de desempenho entre o grupo dos eucaliptos considerado e as madeiras “de lei” e “brancas”.

Tabela 3 - Propriedades características físico-mecânicas de madeiras de uso na dormentação

Nome vulgar ³	Dens. (g/cm ³)	Resistência à Flexão estática		Módulo elasticidade		Flexão Dinâm. (kgf.m)	Dureza Janka (MPa)	Arranc. frontal	
		Mad. Verde (MPa)	Mad. 15% (MPa)	Compressão (MPa)	Flexão (MPa)			Grampo (kN)	Tirefão (kN)
Angico-vermelho	0,97	104,2	143,4	13.130	12.445	6,8	101	34,2	—
Grapia	0,83	95,3	120,0	15.030	11.780	4,3	72	31,1	—
Canafistula	0,87	102,8	120,9	17.220	12.240	2,6	88	35,4	75
Canela-de-veado	0,89	103,4	135,2	13.486	13.202	4,5	76	29,6	—
Peroba-rosa	0,87	99,0	109,6	14.600	19.060	2,6	81	—	—
Canela-imbuia	0,65	78,4	93,4	9.000	7.890	2,1	44	—	—
E. citriodora	0,98	150,0	167,3	21.000	17.700	7,2	91	34,5	—
E. maculata	0,93	125,5	154,6	21.069	18.420	7,1	87	24,8	—
E. paniculata	1,11	148,1	187,1	23.497	21.488	7,2	111	37,1	—
E. siderophloia	1,11	133,3	181,7	21.311	18.865	6,1	107	36,2	—
E. tereticornis	0,95	127,0	157,6	16.380	13.320	6,0	84	30,4	—

Fonte: Niederauer (1982), adaptada por Ballarin (1999)

Tabela 4 - Valores médios de algumas propriedades de grupamentos de madeira

MADEIRA	Dens. (g/cm ³)	Dureza Janka (MPa)	Arranc. frontal (kN)	Flexão estática (MPa)
gênero <i>Eucalyptus</i> ⁴	0,88	87,1	29,8	155
madeiras de lei ⁵	0,84	77,1	32,6	120
madeiras brancas ⁶	0,73	58,1	26,5	107

Fonte: Niederauer (1982), adaptada por Ballarin (1999)

³ No trabalho fonte não constam os nomes científicos

⁴ Consideração exclusiva das espécies mais indicadas para uso como dormentes, segundo NIEDERAUER (1982).

⁵ Angico-vermelho, grapia, canafistula, canela-de-veado, peroba-rosa, canela-imbuia

⁶ Açucará, açoita, canela-amarela, canela-lageana, canela-loura, cangerana, camboatá, guatambú, guajuvira, marmeleiro-do-mato, maria-preta, pessegueiro-bravo, pequiá, rabo-de-bugio, sapopema.

Buscando também a comparação entre o gênero *Eucalyptus* e outras espécies de madeira na produção de dormentes, Ballarin, Franco e Yojo (1998) utilizaram-se de 3 índices de desempenho (I_c , I_2 e I_3), dado por:

$$I_c = \frac{f_{t,90} \cdot \varepsilon_r}{\rho \varepsilon_t \varepsilon_v}, \text{ onde} \quad (2)$$

$f_{t,90}$ - resistência à tração perpendicular às fibras (MPa);

ρ - densidade de massa da madeira (g/cm^3);

ε_r - retratibilidade radial (%);

ε_t - retratibilidade tangencial (%);

ε_v - retratibilidade volumétrica (%);

$$I_2 = \frac{(f_{c,0} + \rho) \cdot \varepsilon_{r,r}}{\varepsilon_{r,t} \cdot \varepsilon_{r,v}} \quad \text{e} \quad I_3 = \frac{(f_{c,0} + \rho)}{\varepsilon_{r,v}}, \text{ onde} \quad (3)$$

ρ - densidade da madeira, em kg/m^3 , e

$f_{c,0}$ - resistência da madeira a compressão paralela às fibras, em MPa, que ponderavam propriedades físico-mecânicas da madeira, com o intuito de obter um valor do desempenho relativo entre elas para esse uso.

Dentre os resultados obtidos, coube destaque à boa classificação do Eucalipto citriodora (*E. citriodora*), quaisquer que fossem os índices de classificação considerados.

De fato, corroborando opiniões de diversos pesquisadores no assunto, dentro desse gênero, essa espécie revela-se como uma das mais promissoras para uso na dormentação de ferrovias.

4.4. A dureza Janka na madeira

A dureza superficial dos materiais, mensurada por uma relação entre força aplicada para endentação superficial de um instrumento no material e a correspondente profundidade de penetração superficial obtida no material, já há muito tempo, tem sido

descrita por vários autores como Brinell, (1900); Janka, (1906); Mörat, (1932) e Kollman e Côté, (1968), citados por Holmberg (2000).

Os métodos gerais de medição da dureza nos materiais podem ser divididos em dois grupos (Tabela 5).

Tabela 5 – Diferentes métodos de determinação da dureza em materiais, tipos de instrumentos de penetração e medidas avaliadas.

Método	Instrumento de penetração							Medida avaliada	
	Esfera	Cilindro	Cunha	Prisma	Cone	Prego	Agulha	Área	Força
Brinell	X							X	
Janka	X								X
Stamer	X							X	X
Krippel	X							X	
Chalais Meudon		X							X
Vickers				X				X	
Büsgen						X			X
Hoppler					X			X	
Doyle Walker			X					X	
Meyer Wegelin							X		X
Monnin		X						X	
Shõre							X		X

Fonte: Adaptado de Holmberg (2000)

O primeiro grupo é caracterizado por medir a força necessária à penetração de uma peça - uma esfera, por exemplo - com deformação previamente especificada. O segundo grupo é caracterizado por medir a deformação (penetração) causada por um instrumento com dimensão e carga de penetração pré-estabelecidos.

Nos ensaios de dureza, a endentação no material pode ser obtida com o uso de vários instrumentos, como cilindros, esferas, prismas ou agulhas.

Na madeira, em particular, utiliza-se a dureza Janka que avalia a resistência oferecida pelo material à penetração superficial de uma esfera de aço, com seção diametral de 1 cm², quando a penetração é induzida até a metade do seu diâmetro. Assim, neste caso, fixa-se a profundidade de penetração da esfera na madeira e avalia-se a força para conseguí-la – ensaio do primeiro grupo. Essa situação é diferente da observada para a dureza

Brinell, indicada normalmente para metais, e que avalia a área endentada pela penetração de um instrumento (esfera, no caso) por uma força pré-estabelecida.

Dentre as propriedades de resistência da madeira, a dureza revela suas potencialidades e pode ser utilizada como ferramenta na caracterização das espécies florestais.

Diversas razões contribuem para que isso ocorra. Primeiramente, pode-se dizer que a dureza Janka apresenta boas correlações com outras importantes propriedades mecânicas da madeira, como por exemplo, a compressão paralela e normal às fibras (IBAMA, 1993; Colenci, 2002). Além disso, os ensaios para obtenção dos valores de dureza, além de práticos e rápidos, danificam de maneira quase que imperceptível a superfície dos materiais o que torna essa prática um importante meio de controle da qualidade dos produtos florestais. Por fim, considerando-se os níveis de carregamento envolvidos na sua determinação (carregamentos não superiores 150 MPa, no geral), que são da ordem de um décimo a um vigésimo dos correspondentes valores necessários nos ensaios de compressão paralela às fibras – referência maior de classificação das madeiras em classes de resistência – vislumbra-se um grande potencial de aplicação desses ensaios em condições de campo.

No contexto nacional, estudos pioneiros sobre a dureza Janka da madeira foram realizados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, (IBAMA, 1993), utilizando-se de 68 espécies nativas da floresta amazônica. Na avaliação da correlação entre esse parâmetro e a resistência à compressão normal às fibras da madeira, os coeficientes de determinação das regressões (R^2) foram de 0,744, quando do uso da dureza paralela às fibras (Figura 6) e 0,865, quando do uso da dureza normal às fibras (Figura 7).

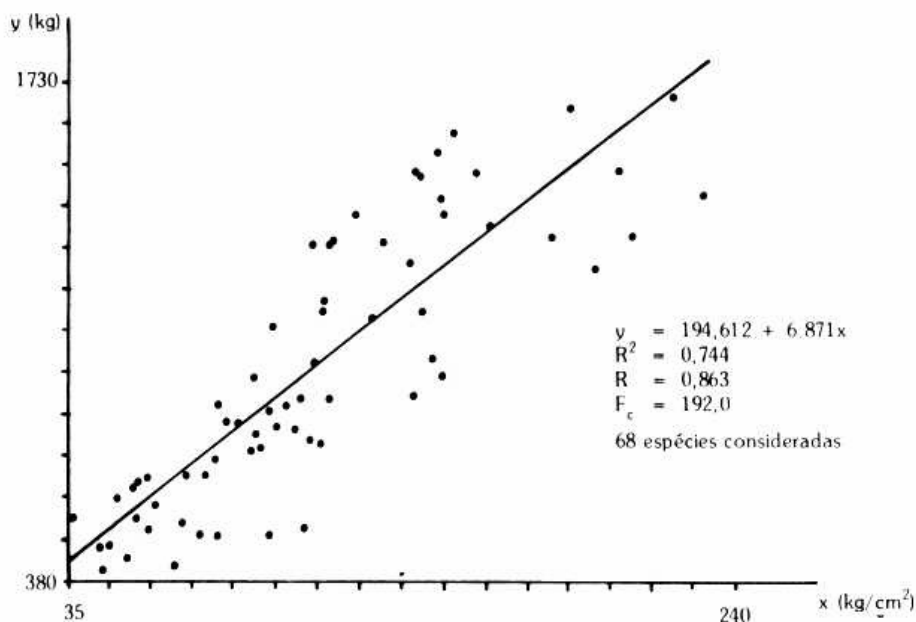


Figura 6- Relação linear entre a dureza paralela às fibras (eixo das ordenadas) e o esforço no limite proporcional na compressão normal às fibras (eixo das abscissas), na condição seca.

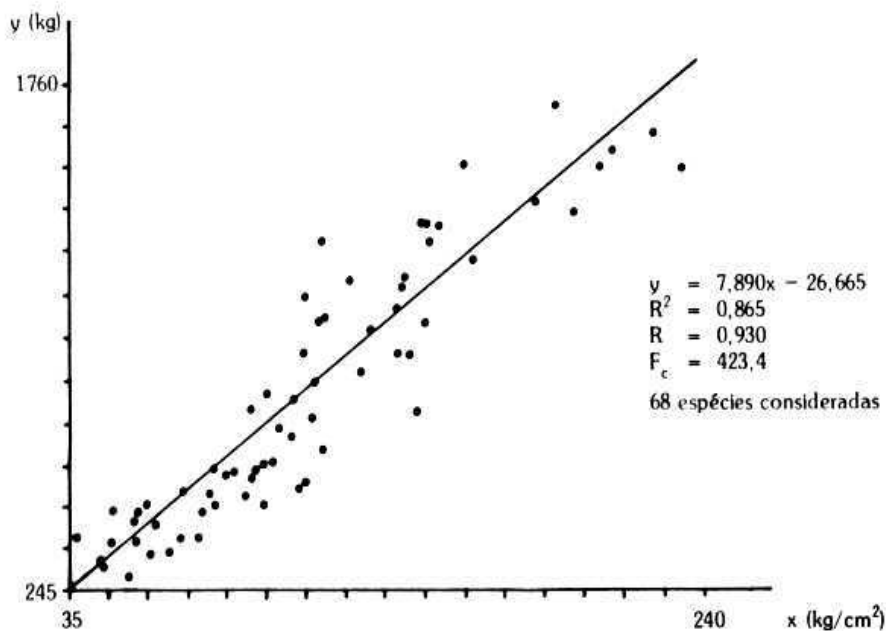


Figura 7- Relação linear entre a dureza normal às fibras (eixo das ordenadas) e o esforço no limite proporcional na compressão normal às fibras (eixo das abscissas), na condição seca.

Avaliações análogas realizadas no mesmo estudo, encaminhadas na situação de madeira verde, levaram a coeficientes de determinação das regressões de 0,805 e 0,734, para os casos de dureza normal e paralela às fibras, respectivamente.

Mais recentemente, Colenci (2002), trabalhando com madeiras das famílias Lauraceae, Vochysiaceae e da espécie *E. citriodora*, estudou a correlação entre a dureza e a resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Do estudo, obteve correlações com coeficientes de determinação de 0,80 e 0,82. As Figuras 8 e 9 apresentam as correlações entre a dureza paralela e normal às fibras (respectivamente) e a resistência compressão paralela às fibras. O teor de umidade dos corpos-de-prova, no momento dos ensaios, variou de 15% a 25%.

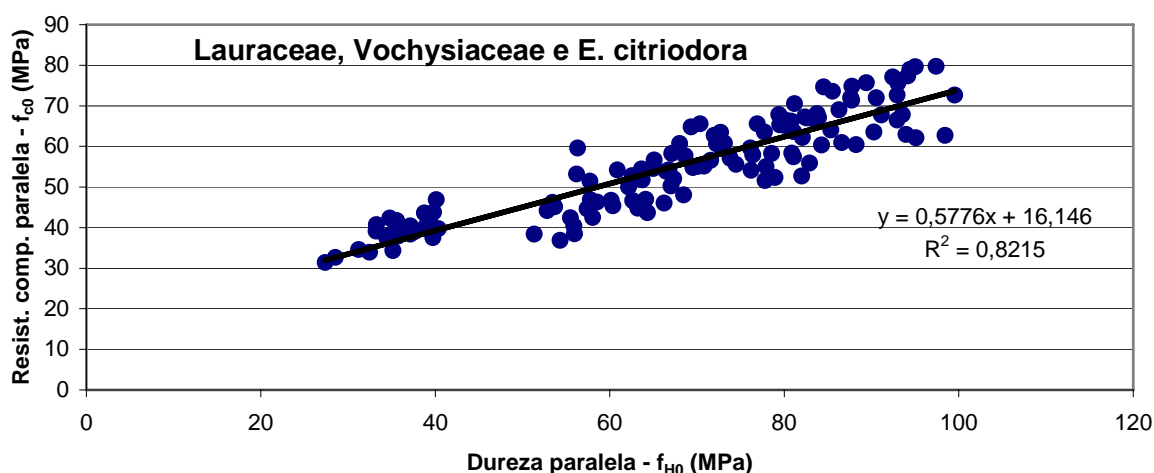


Figura 8 – Correlação entre a dureza paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras – Valores para umidades variáveis nos lotes

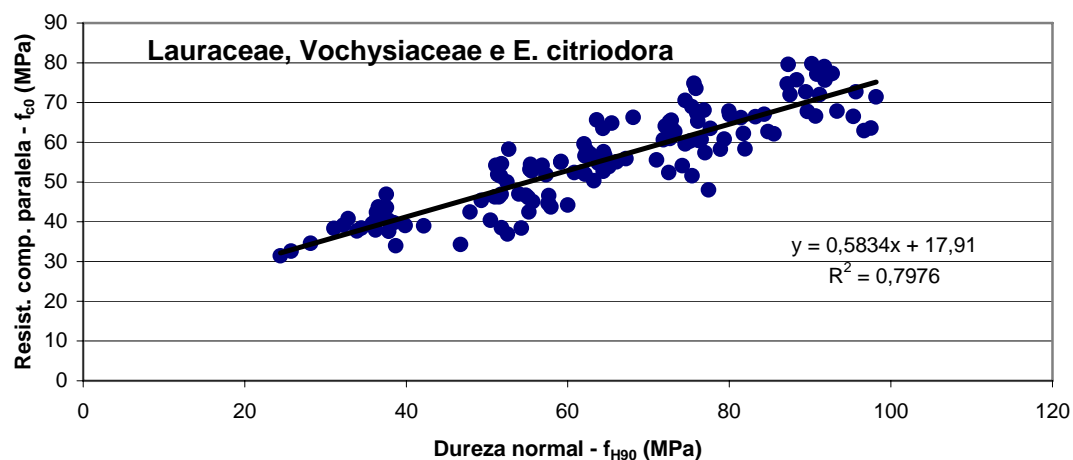


Figura 9 – Correlação entre a dureza normal às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras – Valores para unidades variáveis nos lotes

No mesmo estudo, Colenci (2002) observou que a relação média obtida entre as durezas paralela e normal às fibras foi igual a aproximadamente 1, indicando semelhança das resistências, independentemente da direção de aplicação do carregamento.

A relação entre as durezas Janka nas direções paralela e normal às fibras foi estudada posteriormente por Dal Pogetto (2005). Concluiu que as resistências às durezas paralela e normal às fibras foram estatisticamente iguais nos lotes de madeira estudados, não revelando, assim, comportamento mecânico diferenciado e superior do material para essa solicitação na direção paralela, conforme poderia ser esperado, em princípio, por extensão de um raciocínio geral vigente para as demais solicitações mecânicas. Concluiu, ainda, que a relação entre as resistências à dureza paralela (f_{H0}) e normal às fibras (f_{H90}) é dependente da densidade da madeira, decrescendo à medida que se aumenta a densidade; para madeiras mais densas a relação é sempre menor do que a observada em madeiras menos densas.

No estudo, os valores da relação f_{H0}/f_{H90} variaram de 0,7 a 2,0, com valor médio igual a 1,1. Para o grupo do *E.citriodora*, mais denso dentre os estudados, a relação média foi igual a 0,9. A dureza em madeiras possui uma grande variação de valores entre as diferentes espécies estudadas, inclusive em espécies do mesmo gênero e em posições diferentes dentro de uma mesma amostra, como mostrado em estudos conduzidos no Brasil

pela SIF (Sociedade de Investigações Florestais), dos quais foram avaliadas e caracterizadas as propriedades mecânicas de 44 genótipos (13 anos a 17 anos) obtidos em povoamentos de híbridos de *Eucalyptus* (CAIXETA *et al.*, 2003).

Testes com *Eucalyptus dunnii*, usando-se toras com duas idades (9 anos e 25 anos) mostraram que a dureza é maior aos 25 anos de idade para esta espécie: os valores de dureza Janka atingiram 45,2 MPa para madeiras de 9 anos e 63,0 MPa para madeiras com 25 anos. (DICKSON *et al.*, 2002).

4.5 A dureza Brinell na madeira

Chiaverini (1977), cita que a dureza por penetração proposta por J. A. Brinell em 1901, denominada dureza Brinell e simbolizada por **HB**, é o tipo de dureza mais usado até hoje na Engenharia com grande aplicação na área metalúrgica.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço, de diâmetro D , sobre a superfície plana, polida e limpa de um metal através de uma força “P”, durante um tempo, “t”. Essa compressão provocará uma impressão permanente no metal, com o formato de uma calota esférica, tendo um diâmetro, d , o qual é medido por intermédio de um micrômetro óptico (microscópio ou lupa graduados), depois de removida a carga. O valor do diâmetro “ d ” deve ser tomado como a média de duas leituras feitas a 90 graus uma da outra. A dureza Brinell obtida pela relação entre a força aplicada (P) e a área da calota esférica impressa no material é dada pela expressão:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} (\text{kgf} / \text{mm}^2), \text{ onde} \quad (4)$$

HB = dureza Brinell (kgf/mm²)

P = carga aplicada (kgf)

D = diâmetro da esfera de aço – endentador (mm)

d = diâmetro da endentação (mm)

A impressão será tanto maior quanto mais mole for o metal; ou seja, quanto mais facilmente ele aceitar a penetração.

A equação pressupõe que qualquer carga e qualquer diâmetro de esfera possam levar, num mesmo material, a valores idênticos de dureza. Isso, entretanto, não ocorre na prática, pois a esfera penetradora pode sofrer ligeira deformação durante a aplicação da carga e a calota esférica obtida pode não ser rigorosamente esférica.

Meyer (1908), conforme citado por Souza (1974), mostrou que variando os diâmetros da esfera, mas com as mesmas cargas, os números de durezas obtidos eram idênticos, desde que a relação P/D^2 fosse constante. Mostrou ainda que utilizando a mesma esfera, os números obtidos de dureza sofriam a mínima variação, quando as aplicáveis a diferentes materiais metálicos as cargas produziam impressões de diâmetros d compreendidos entre $0,3D$ e $0,6D$, onde D é o diâmetro da esfera.

Desta forma, no ensaio de dureza Brinell, deve-se escolher cargas P e diâmetro D de esferas tais que se verifiquem as seguintes relações:

- $P/D^2 = \text{constante}$
- $0,3D < d < 0,6D$

A Tabela 6, extraída de Chiaverini (1977), apresenta valores da relação P/D^2 .

Além dos fatores mencionados, outros que podem influir nos resultados dos ensaios são a distância entre o centro da impressão e a borda da peça a ser ensaiada, e a relação entre o diâmetro da impressão e a espessura da peça.

Tabela 6 - Valores de dureza em função da relação P/D^2 no ensaio de dureza Brinell .

P/D^2	Dureza, kgf/mm^2	Materiais ensaiados
5	Entre 90 e 415 Entre 30 e 140	Aços e Ferros Fundidos Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
	Entre 15 e 70	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	Até 30	Chumbo, estanho, antimônio e metais patentes

Fonte: Chiaverini (1977)

Se a impressão é feita muito próxima da borda, a falta de suporte lateral ocasionará maior deformação maior do material nesse lado, alterando os resultados. Para isso a superfície a medir deve permitir a inscrição de uma circunferência de raio mínimo igual a 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada.

Se a espessura da peça cuja a dureza se vai determinar for muito pequena, a deformação do material é influenciada pela base sobre a qual a peça se apóia, pela sua contribuição à resistência à deformação, o que também pode afetar os resultados. Para isso a espessura da peça a ser medida deve ser no mínimo igual a 2 vezes o diâmetro da impressão obtida.

Por fim, deve-se cuidar para que cada impressão fique distante de uma impressão vizinha, no mínimo 2,5 vezes o seu diâmetro (distância de centro a centro).

A Tabela 7, extraída de catálogo da Panambra – Controle de Dureza – apresenta valores da carga de endentação e campo de aplicação para diferentes diâmetros:

Considerando-se as particularidades reológicas da madeira, nota-se a maior apropriação do ensaio de dureza Janka, em detrimento do ensaio de dureza Brinell. De fato, nos ensaios de dureza que avaliam a área endentada por uma determinada força, há que se considerar o fenômeno “*sinking in*”, presente em alguns materiais resilientes, como a madeira. Ao ser retirada a força que promoveu a deformação plástica, o material recupera parte da deformação sofrida (conservação da energia), ficando, normalmente, imprecisa a avaliação da área endentada.

Tabela 7 - Carga de endentação e campo de aplicação para diferentes diâmetros da esfera de endentação

Carga P (kgf) e Campo de aplicação					
Diâmetro da Esfera (mm)	Espessura mínima do material (mm)	Aços, Ferro Fundido (P=30D ²)	Bronze e Latão duro (P=10 D ²)	Cobre, Alumínio e suas ligas (P=5 D ²)	metais moles (P=2,5 D ²)
10	6	3000	1000	500	250
5	3	750	250	125	62,5
2,5	3	187,5	62,5	31,25	15,625

Fonte: Panambra adaptado por este autor

Mesmo com essas limitações, alguns pesquisadores têm sugerido a utilização da dureza Brinell para madeiras em condições de campo, considerando-se, sobretudo, a menor magnitude das forças envolvidas no ensaio Brinell e a dificuldade de se controlar, em condições de campo, a profundidade de penetração da esfera, exigida no ensaio de dureza Janka.

Bektas *et al.* (2001), por meio de ensaios de dureza utilizando os dois métodos — Brinell e Janka — estudou a existência de uma relação linear entre esses dois métodos. Foram realizados ensaios de dureza nas três direções de orientação das fibras da madeira: tangencial, radial e longitudinal, onde chegou-se aos valores máximos dos coeficientes de correlação ($R = 0,91$) e determinação ($R^2 = 0,83$), quando consideradas as três direções em conjunto (Figura 10). Os valores médios das durezas variaram de um mínimo de 4180 N (equivalente a uma dureza de 41,80 MPa, considerando-se a área projetada de endentação de 1 cm²) e 28 kgf/mm² e um máximo de 69,03 MPa e 58 kgf/mm² para os métodos Janka e Brinell, respectivamente.

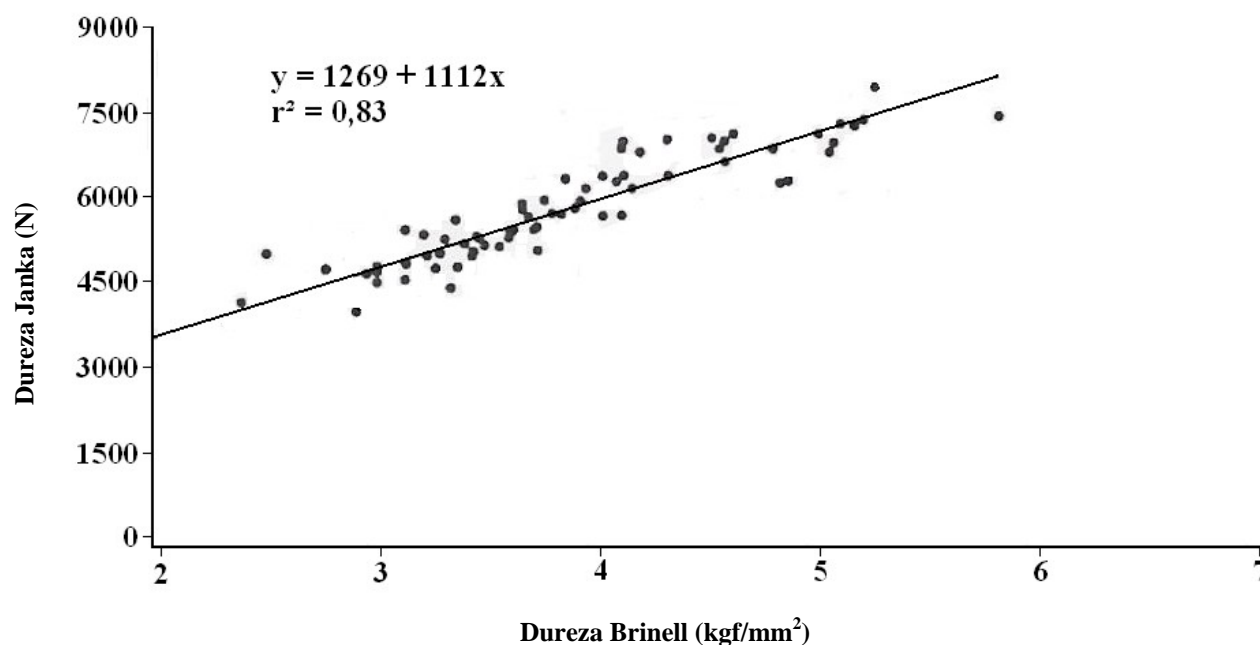


Figura 10 – Relação entre os métodos de dureza Brinell e Janka no total das três direções (radial, tangencial e longitudinal).

Os ensaios de dureza Janka também têm sido utilizados na qualificação de produtos compostos de madeira (compósitos), como, por exemplo, os painéis (compensado, aglomerado, LVL e MDF).

Por outro lado, estudos sobre as propriedades mecânicas da madeira são de fundamental importância às empresas de desdobro desse material, visto que é necessária a regulação dos equipamentos como serras ou plainas. Esta regulação recai, principalmente, na relação entre a rotação e a resistência ao corte oferecida pelo material, ligada diretamente a densidade do material. Pode influenciar no aquecimento da ferramenta de corte, diminuindo sua vida útil e impossibilitando uma textura homogênea na superfície serrada.

4.6 Equipamentos portáteis de medição de dureza

No mercado brasileiro não existem equipamentos portáteis específicos para a medição de dureza em madeiras. De uma busca em catálogos e sites das principais empresas fornecedoras dessas linhas de equipamentos pode-se listar as seguintes ocorrências:

- Durômetro Portátil tipo King, para a avaliação da dureza Brinell, marca Indentec – Inglaterra – Modelo 134.
- *Laminated Wood Hardness Testing Tool*
- Durômetro Shore Modelo ES19-HP
- Durômetro Portátil com leitura eletrônica digital – modelo TH 130
- Durômetro em fase de testes – dureza Janka – do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

O Durômetro Portátil tipo King, marca Indentec, é disponibilizado comercialmente para avaliação da dureza Brinell em metais. Por essa razão, dispõe de um manômetro com indicação de valor mínimo de carga de 500 kgf (4900N). Apresenta-se como um aparelho de construção robusta para carga de teste de até 3000 kgf (29.420N) e sistema mecânico de funcionamento através de rosca sem fim. O preço de mercado é de € 4.893,00, equivalente a R\$ 10.000,00 (Figura 11).



Figura 11 - Durômetro King – modelo 134

O Durômetro denominado “*Laminated Wood Hardness Testing Tool*” apresenta-se como um equipamento com mobilização da força de endentação por meio de mola (Figura 12). As poucas especificações técnicas disponíveis do equipamento encontram-se no site: <http://www.mak2.it/durlaminin.html>



Figura 12 - *Laminated Wood Hardness Testing Tool*

O Durômetro Modelo ES19-HP é utilizado para avaliação da dureza Shore em polímeros sólidos (plásticos, borrachas, etc.). O preço de mercado é de U\$S 325,00 equivalente a R\$ 720, 00, (Figura 13).



Figura 13 - Durômetro Shore – Modelo ES19-HP

O Durômetro portátil com leitura eletrônica digital – Modelo TH 130 combina uma série de possibilidades de se testar várias durezas com um único processador eletrônico. O princípio de funcionamento do aparelho se dá pela ação de uma esfera metálica, aplicada diretamente na superfície do material a ser avaliado. Quando a esfera é projetada contra a superfície do material, pela ação de uma mola acionada a partir de um gatilho, avalia-se a dureza pelo ricochete da esfera. Mediante seleção no aparelho pode-se inferir, a partir dessa leitura, as durezas Brinell, Shore, Vickers e Rockwell. O preço de mercado do equipamento é de, aproximadamente, R\$ 7.000,00 (Figura 14).



Figura 14 - Durômetro portátil com leitura eletrônica digital – Modelo TH130 – *Integrated Hardness Tester*.

Testes com o equipamento, realizados por Colenci (2004)⁷ mostraram sua inadequação na avaliação da dureza em madeiras, caracterizada pela grande oscilação de leituras em pontos adjacentes do material.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo desenvolveu um equipamento para medição de dureza em madeiras utilizando o princípio de bomba hidráulica manual (Figura 15). Até o momento não existem trabalhos reportando o funcionamento do equipamento.



Figura 15 - Durômetro Janka - IPT

4.7 Considerações sobre a revisão bibliográfica

As ferrovias brasileiras vêm enfrentando várias dificuldades no tocante à substituição dos dormentes em suas vias permanentes, uma vez que a necessidade de manutenção é cada vez mais imediata, por conta do atual estado de deterioração em que se encontram.

Na escolha da espécie mais apropriada para esse fim têm-se usado critérios baseados, muitas vezes, apenas na experiência das empresas ferroviárias, ocasionando aquisições indevidas. Adicionalmente, a pressão legal pela restrição na extração de madeiras provenientes de diversas espécies nativas tem feito com que as empresas busquem, em proporções crescentes, madeiras de reflorestamento para confecção dos novos dormentes.

Por outro lado, a grande semelhança anatômica entre algumas espécies de reflorestamento (sobretudo do gênero *Eucalyptus*) dificulta o processo de aceitação ou rejeição dos dormentes já serrados. Nota-se, portanto, a necessidade urgente de definição ensaios rápidos, eficientes e aplicáveis nas condições de campo, para auxiliar no processo de aceitação e rejeição desses elementos.

Os ensaios de dureza paralela e normal às fibras têm sido utilizados como ferramenta para classificação inicial de peças de madeira, sobretudo pela sua praticidade. Embora de efeito localizado, na medida em que seus resultados são atribuíveis somente a uma pequena região da peça - nas circunvizinhanças do ponto de endentação da esfera – seus resultados apresentam boa correlação com a resistência à compressão paralela às fibras da madeira, parâmetro utilizado na atribuição de classes de resistência ao material.

Dentre os métodos empregados para a avaliação da dureza nos diferentes materiais, o método Janka é, sem dúvidas, o mais adequado à madeira. Em trabalhos recentes tem-se estudado a utilização da dureza Brinell - indicada em princípio para o aço e de uso pouco tradicional na tecnologia da madeira - como ferramenta para avaliação da qualidade desse material. A existência de correlações estatisticamente significativas entre a dureza Brinell e a dureza Janka abonaria a prática de utilização dessa dureza para ensaios em madeiras.

⁷ Testes efetuados pelo autor na loja Salvi Casagrande, de São Paulo – SP em 2004, não reportados em relatório.

Essa opção se justificaria, ainda, pela menor magnitude das forças envolvidas no ensaio Brinell (em relação ao ensaio de dureza Janka) e pela dificuldade de se controlar, em condições de campo, a profundidade de penetração da esfera, exigida no ensaio de dureza Janka.

Considerando-se os altos preços dos equipamentos portáteis de dureza Brinell , evidencia-se a importância e oportunidade do desenvolvimento de um equipamento para a avaliação em campo da dureza de madeiras, com base no método Brinell, com baixo custo e facilidade de utilização.

5. MATERIAL E MÉTODOS

As informações obtidas na revisão bibliográfica balizaram as etapas seguintes deste trabalho, que visavam o desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza em madeiras.

A escolha inicialmente feita foi a de um **equipamento semelhante ao utilizado para avaliação da dureza Brinell** (com carga de endentação fixa e avaliação posterior da superfície endentada) tendo-se em conta que a dureza Brinell mobiliza forças de menor magnitude (em comparação com aquelas requeridas na metodologia Janka para madeiras) e a dificuldade de se controlar, em condições de campo, a profundidade de penetração da esfera exigida no ensaio de dureza Janka, conforme já comentado. A escolha foi ainda balizada nas iniciativas já reportadas de uso da metodologia Brinell para madeiras.

Considerando-se os mecanismos - passíveis de utilização em condições de campo - para mobilizar a força necessária à endentação superficial de esfera de aço no material em estudo, optou-se por utilizar o mecanismo de **endentação por queda livre de massa**, em detrimento da cravação com uso de atuador hidráulico e endentação por mobilização de força de uma mola comprimida. A escolha recaiu na opção que resultava em equipamento mais leve (sem necessidade de pesados reservatórios para óleo dos sistemas hidráulicos), mobilizando força constante ao longo do tempo, o que não ocorre, na maioria das vezes, com sistemas que utilizam mola.

Por fim, considerando-se os resultados de Colenci (2002) e Dal Pogetto (2005), no tocante à igualdade estatística das durezas Janka paralela (f_{H0}) e normal às fibras (f_{H90}), e considerando-se a maior facilidade de mensuração da dureza normal às fibras em condições de campo, optou-se por mensurar somente essa variável.

O programa experimental foi dividido em três partes distintas:

1. Estudo exploratório para dimensionamento do equipamento portátil de avaliação da dureza;
2. Projeto do equipamento;
3. Ensaio de calibração do equipamento.

5.1 Estudo exploratório

Foram realizados ensaios com o objetivo de se determinar a energia mobilizada na cravação da esfera na madeira, para dimensionamento do equipamento.

De testes preliminares de dureza Brinell na madeira, realizados com equipamentos comerciais, utilizados na avaliação de metais e ligas pela empresa Aeronáutica Neiva, de Botucatu, verificou-se que a medição dos diâmetros da endentação na madeira, com uso dos aparelhos ópticos convencionais (lupas com aumento de 10x), ficava muito prejudicada quando a esfera de endentação tinha diâmetros inferiores a 10mm (2,5mm e 5mm). Assim, optou-se por utilizar esfera de 10mm para endentação.

Os ensaios-piloto para quantificação da energia necessária à cravação da esfera pelo método Brinell foram por fim realizados em máquina universal de ensaio servo-controlada DL 10000-MF, da EMIC, com capacidade nominal de carga de 100kN. A endentação foi promovida por peça metálica especialmente confeccionada para essa finalidade, respeitando-se o formato esférico da cabeça de endentação, com diâmetro nominal de 10mm.

Nos ensaios-piloto foram utilizadas amostras de madeira disponíveis no Laboratório de Ensaio de Materiais – Departamento de Engenharia Rural, na forma de corpos-de-prova prismáticos de 5cm x 5cm x 15cm das espécies *Nectandra* (canela), *Qualea* (mandioqueira ou cambará) e *Eucalyptus citriodora*, estudando-se endentações normais às fibras da madeira, com cargas e velocidades de carregamento variáveis. Para cada situação de estudo (carga, velocidade de carregamento e espécie) utilizaram-se 8 repetições.

5.2 Projeto do equipamento

O equipamento recebeu a denominação Durômetro Portátil para Madeiras. Foi projetado a partir dos resultados obtidos no estudo exploratório, apresentando a conformação geral ilustrada na Figura 16.

Complementarmente ao aparelho, foi utilizada uma lupa graduada marca Holtermann (Figura 17) modelo LH 20/10X, com fundo de escala de 20mm e sensibilidade de 0,1mm, para mensuração do diâmetro da endentação na madeira promovida pela queda livre do peso. Atendendo-se ao preconizado nos manuais técnicos de equipamentos comerciais de dureza Brinell, foram feitas duas medições de diâmetro de endentação, ortogonais entre si, nas direções paralela e normal às fibras.

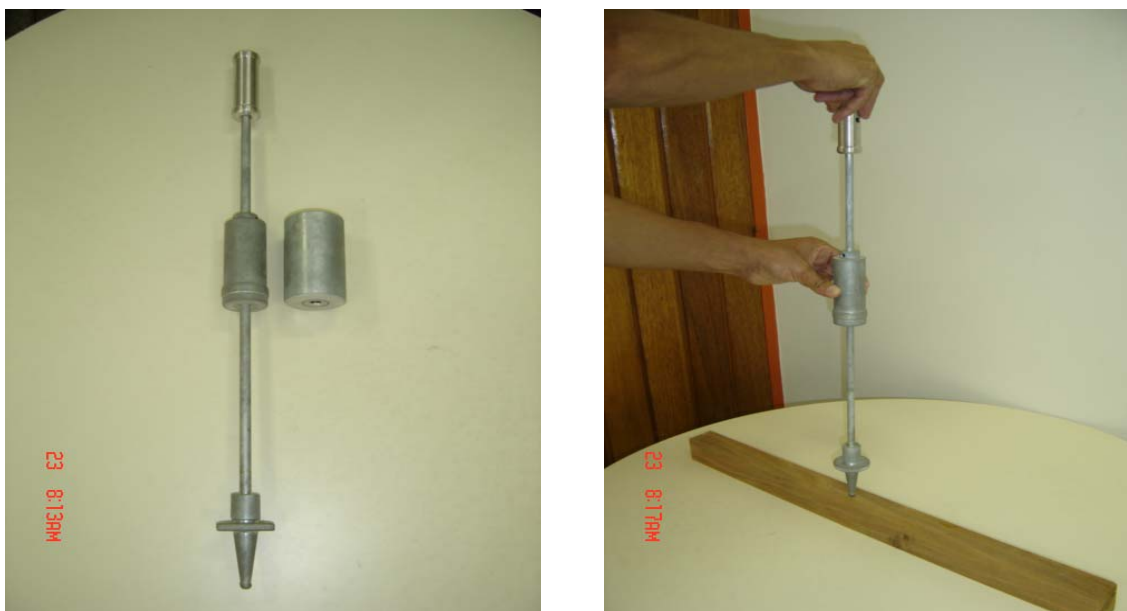


Figura 16 – Durômetro portátil para madeiras – aspectos gerais do equipamento (esquerda) e forma de utilização na madeira para avaliação da sua dureza (direita).

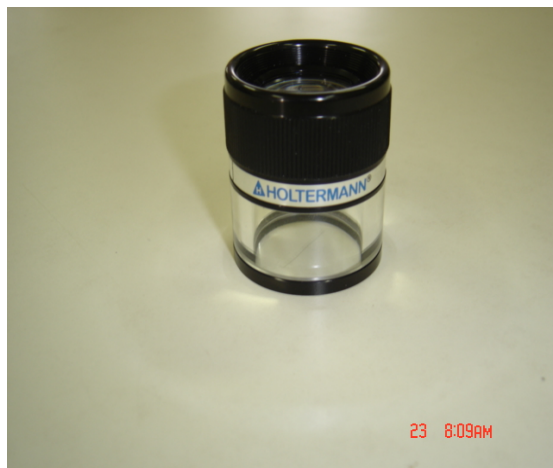


Figura 17 – Lupa graduada marca Holtermann modelo LH 20/10X

Buscando avaliar o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição, foram feitos ensaios repetitividade de leituras do durômetro com o objetivo de se avaliar a confiabilidade do aparelho. Para isso foram mantidas as condições de medição que são:

- mesmo procedimento de medição
- mesmo observador
- mesmo instrumento de medição
- mesmas condições de operação do instrumento
- mesmo local
- repetições em curto espaço de tempo

A repetitividade foi expressa, quantitativamente, em função das características da dispersão dos resultados, reportando-se o coeficiente de variação (CV) e o intervalo de confiança da média (IC).

Para a realização desse ensaio foi utilizada uma chapa de liga de alumínio 2024 – T3 ALCOA medindo 20 x 30cm dividida em espaçamento de 6,0cm com 10 repetições de 10 leituras, sendo o primeiro ensaio realizado com a máquina tipo Testor HT1 – SÜSSEN – WOLPERT de propriedade da EMBRAER de Botucatu para dureza Rockwell B, sendo convertidas em dureza Brinell através da tabela de equivalência entre durezas, baseada

na norma ASTM E140 - Rockweel B Hardness da ARMCO. As demais leituras foram realizadas com o durômetro portátil, obedecendo aos mesmos procedimentos (Figura 18).

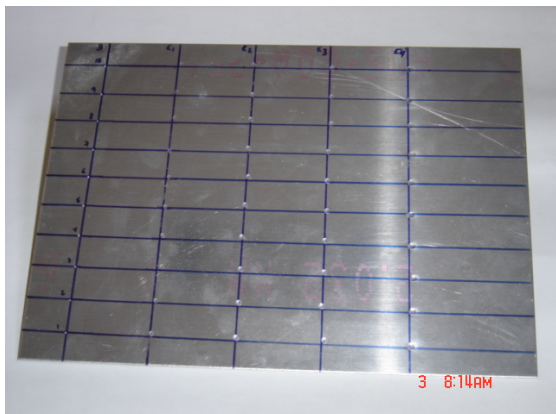


Figura 18 – Chapa de alumínio utilizada para os ensaios de repetitividade

5.3 Ensaio de calibração do equipamento

Todos os ensaios de calibração do equipamento foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu.

5.3.1 Material

Para a calibração do equipamento buscou-se a utilização de madeiras de diferentes procedências, reunidas em lotes, cada um deles potencializando algumas características (idade do plantio, espécie botânica, tipo de lenho, entre outras) de interesse ao estudo. A Tabela 8 apresenta os dados principais dos lotes de madeiras amostrados.

Cada lote foi formado por 12 vigas prismáticas de $(6 \times 12 \times 120) \text{cm}^3$, aqui consideradas como repetições do lote, que foram doadas por empresas, já nesse formato e dimensões. Na maioria das vezes (exceção se faz ao lote 1, no qual a madeira já estava previamente desdobrada em vigas), da madeira em toras disponibilizada nas empresas doadoras, sob acompanhamento da equipe de pesquisa, nas próprias empresas eram desdobradas as 12 vigas, contemplando-se a maior variação possível nas toras utilizadas, mas resguardando-se que elas (toras) pertencessem a uma mesma “partida”.

De cada viga foi produzido um caibro com dimensões aproximadas de $(6 \times 6 \times 120) \text{cm}^3$, retirado da região da viga que apresentava maior homogeneidade do material e, por conveniência, menor incidência de defeitos (Figuras 19 e 20).

Cada caibro foi desdobrado ao meio em seu comprimento, resultando dois caibros com cerca de 50cm, que se constituíram, por fim, no material para os testes de calibração do equipamento.

Assim, para cada lote de madeira, foram produzidos corpos-de-prova para ensaios de calibração (com 12 repetições cada).

Em cada lote (Tabela 8), os 12 caibros de 50 cm de comprimento, na umidade de recebimento da madeira, tiveram suas dimensões nominais finais ajustadas para $(5 \times 5 \times 50) \text{cm}^3$ e nele foram feitos os ensaios de calibração do equipamento.

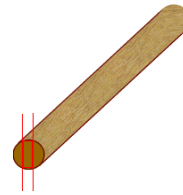
Tabela 8 - Dados principais dos lotes de madeira empregados

Lote	Madeira	Procedência	Características do lote
1	<i>E.citriodora</i>	Madeira São Caetano Itatinga - SP	Lote amostrando madeira de espécie de reflorestamento de uso potencial como dormente. Madeira com idade superior a 40 anos
2	<i>E.citriodora</i>	Madeira São Caetano Itatinga - SP	Lote amostrando madeira de espécie de reflorestamento de uso potencial como dormente. Madeira com idade superior a 40 anos
3	<i>Goupia glabra</i> (Cupiúba)	Murba Madeiras Botucatu-SP	Lote amostrando espécie nativa de uso corrente na confecção de estruturas de madeira
4	<i>E. saligna</i>	PREMA Madeira tratadas Rio Claro - SP	Lotes amostrando madeiras de espécies de reflorestamento com uso na produção de dormentes. Madeira amostrada da serraria de empresa fornecedora de dormentes para as concessionárias das ferrovias brasileiras
5	<i>E. citriodora</i>		
6	<i>E. grandis</i>		
7	<i>E. tereticornis</i>		
8	<i>E. urophylla</i>		
9	<i>E. citriodora</i>	Moretto Madeira de Eucalipto Botucatu - SP	Lotes amostrando madeiras com lenho com predominância de alburno
10	<i>E. citriodora</i>		Lotes amostrando madeiras com lenho com predominância de alburno
11	<i>E. citriodora</i>		
12	<i>E. citriodora</i>		
13	<i>Bagassa guianenses</i> (Tatajuba)	MOHR Madeiras São Paulo - SP	Lote amostrando espécie nativa de elevada densidade, com uso potencial na produção de dormentes
14	<i>E.grandis</i>	Duratex S/A Botucatu - SP	Lotes amostrando madeiras de reflorestamento com grande predominância de alburno. Madeira com idade de 6 anos.
15	<i>E.grandis</i>	Duratex S/A Botucatu - SP	Lotes amostrando madeiras de reflorestamento com grande predominância de alburno. Madeira com idade de 6 anos.
16	<i>E.grandis</i>	Duratex S/A Botucatu - SP	Lotes amostrando madeiras de reflorestamento com grande predominância de alburno. Madeira com idade de 6 anos.

Na empresa

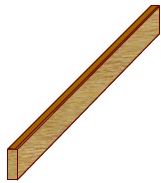


Mesma "partida" de madeira

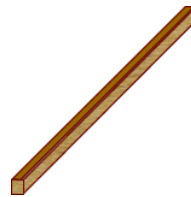


12 vigas de
(6 x 12 x 120) cm³

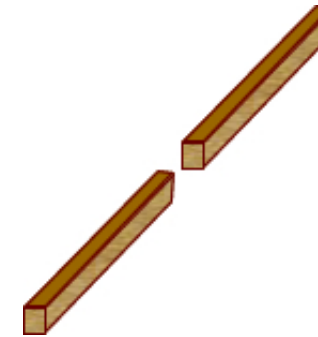
Na marcenaria da FCA



12 vigas de
(6 x 12 x 120) cm³



12 caibros de
(6 x 6 x 120) cm³



12 caibros de
(6 x 6 x 50) cm³



12 caibros de (5 x 5 x 50) cm³



Ensaios mecânicos na unidade de recebimento
(12 repetições)

Figura 19 - Seqüência de desdobro das toras até o material para produção dos corpos-de-prova.



Figura 20 - Desdobro da tora em vigas e estoque de caibros de $(6 \times 6 \times 120) \text{ cm}^3$

5.3.2 Métodos

Visando a calibração do durômetro portátil para madeiras, foram realizados os seguintes ensaios na madeira:

- Ensaio de Dureza Janka (em máquina universal de ensaios)
- Ensaio de Dureza Brinell (em máquina universal de ensaios)
- Ensaios de Dureza com o durômetro portátil (4 situações distintas)
- Ensaio de compressão paralela às fibras
- Densidade de massa
- Umidade

A Figura 21 ilustra a demarcação no caibro de $(5 \times 5 \times 50) \text{ cm}^3$ das regiões onde foram realizados os ensaios citados, bem como os locais das endentações nos ensaios de dureza. Nota-se que, seguindo metodologia proposta por Colenci (2002), procurou-se, ao máximo, respeitar o caráter “pontual” dos ensaios de dureza, realizando-os o mais próximo possível um do outro (com afastamento mínimo de 3,5 cm um do outro) e minimizando, assim, influências da variação da região da peça onde a propriedade é avaliada. O mesmo método foi observado na obtenção do corpo-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras (no qual foram feitos, também, os ensaios de densidade de massa e de umidade). Pode-se dizer, assim, que o corpo-de-prova para os ensaios de dureza era um sólido prismático (caibro) de $(5 \times 5 \times 35) \text{ cm}^3$ e o corpo-de-prova de compressão paralela às fibras tinha $(5 \times 5 \times 15) \text{ cm}^3$.

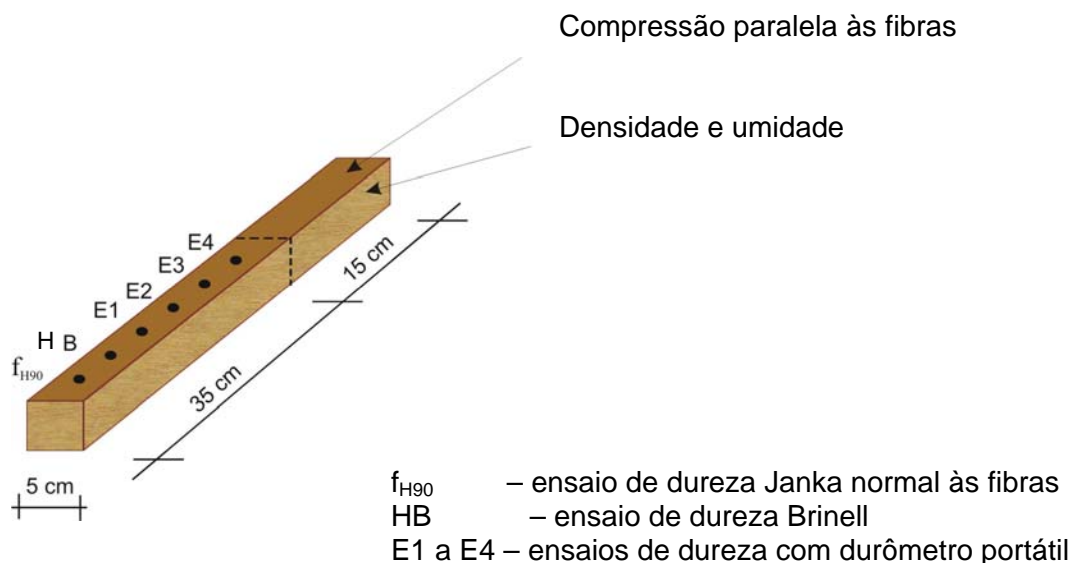


Figura 21 - Regiões dos caibros onde foram realizados os ensaios mecânicos

Os ensaios de dureza Janka e dureza Brinell foram realizados em máquina universal de ensaio servo-controlada DL 10000-MF, da EMIC, com capacidade de carga aproximada de 100kN. O ensaio de compressão paralela às fibras foram realizados em prensa elétrica hidráulica EMIC, com capacidade de 1.000 kN.

Os ensaios de dureza Janka (na direção normal às fibras) e o ensaio de compressão paralela às fibras seguiram o preconizado pela NBR 7190/97.

A dureza Janka normal às fibras (f_{H90}) foi determinada convencionalmente pela tensão (em MPa), atuante na face paralela às fibras do corpo-de-prova prismático, que produz a penetração da área da seção diametral de uma semi esfera de aço de 1 cm², na profundidade igual ao seu raio. A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) foi obtida pela máxima tensão (em MPa), atuante na seção transversal de 5cm x 5cm, do corpo-de-prova. A figura 22 ilustra aspectos gerais desses dois ensaios.

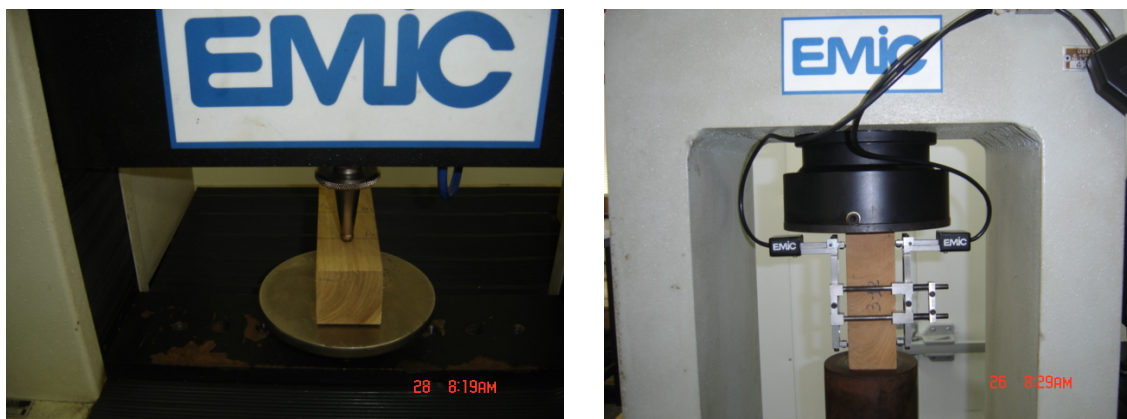


Figura 22 - Aspectos gerais do ensaio de dureza Janka normal às fibras (esquerda) e do ensaio de compressão paralela às fibras (direita)

Os ensaios de dureza Brinell foram realizados utilizando-se esfera de endentação de 10mm, carga de endentação de 980 N (100 kgf) e velocidade de endentação de 1mm/min, atendendo aos resultados obtidos nos ensaios-piloto. Foi utilizado papel carbono entre a esfera de endentação e a madeira, para salientar a endentação, melhorando a definição dos limites da calota esférica conformada na madeira, e assim permitindo uma sistematização dessa mensuração.

Da mesma forma que nos ensaios-piloto, os diâmetros da calota esférica foram avaliados com a lupa graduada, em local de boa luminosidade, com o cuidado de não se cometer erros de paralaxe. No cálculo da dureza Brinell foi utilizada a média aritmética dos 2 diâmetros (ortogonais entre si) mensurados e a equação 4.

A Figura 23 ilustra a endentação e a calota esférica obtida.



Figura 23 - Endentação no ensaio de dureza Brinell (esquerda) e calota esférica obtida (direita).

Os ensaios de dureza com o durômetro portátil foram realizados em quatro situações distintas apresentando variação da energia de endentação ou da massa em queda livre, tendo os seguintes parâmetros:

- Situação 1** – queda livre de uma massa de 1kg, à altura de 100mm (Energia 100kgf.mm)-originando a dureza E1;
Situação 2 - queda livre de uma massa de 1kg, à altura de 200mm (Energia 200kgf.mm)- originando a dureza E2;
Situação 3 - queda livre de uma massa de 2kg, à altura de 100mm (Energia 200kgf.mm)- originando a dureza E3;
Situação 4 - queda livre de uma massa de 2kg, à altura de 200mm (Energia 400kgf.mm)- originando a dureza E4.

A endentação foi mensurada com os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios de dureza Brinell, realizados na máquina universal de ensaios, já descritos.

Fazendo-se uso do mesmo raciocínio utilizado no cálculo da dureza Brinell, a dureza avaliada pelo durômetro portátil para madeiras (E1 a E4) foi calculada como uma relação entre a energia disponibilizada na queda livre da massa (ao invés da carga, utilizada na dureza Brinell) e a área da calota esférica endentada, com uso da equação:

$$E = \frac{2 \text{ Energia}}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{onde:} \quad (5)$$

Energia - energia disponibilizada na queda livre da massa (em kgf.mm)

D - diâmetro do indentador metálico (fixado em 10mm)

d - diâmetro da calota endentada na madeira (em mm)

Da análise dimensional da Equação (5), resultou um valor de dureza expresso em kgf/mm (quilogramas-força por milímetro).

A avaliação sistemática da umidade nos corpos-de-prova foi conduzida no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP – Botucatu, por meio de medições das massas úmida e seca com balança digital da marca Gehaka, modelo BG 1000, com precisão de 0,01g e capacidade de 1000 g.

Para esse ensaio foi atendido, na íntegra, o preconizado pela NBR 7190 (ABNT, 1997) no tocante as temperaturas e variações máximas de massa entre pesagens sucessivas em intervalos de 6 horas.

A secagem a 0% de umidade foi feita em uma estufa da marca Fanem 515C, com temperatura máxima em torno de 103°C.

Na determinação da densidade de massa da madeira, realizada com os corpos-de-prova de $(5 \times 5 \times 15) \text{cm}^3$, atendeu-se, no geral, o procedimento preconizado pela NBR 7190/97 (ABNT, 1997).

5.4 Análise dos resultados

Os resultados da primeira parte do programa experimental - ensaios-piloto para dimensionamento do equipamento portátil para avaliação da dureza – foram avaliados pela quantificação da energia necessária à cravação da esfera pelo método Brinell e cálculos de valores característicos dessa propriedade (média, desvio-padrão, valores máximos e mínimos) em cada uma das amostras estudadas.

A análise principal, conduzida na segunda parte do programa experimental, recaiu sobre uma avaliação qualitativa da funcionalidade de uso do aparelho portátil, a partir de seu uso sistemático e criterioso no Laboratório de Ensaio de Materiais.

A calibração do durômetro portátil para madeiras será obtida mediante estabelecimento de equações de regressão entre os valores de dureza obtidos nas 4 situações de estudo do durômetro (E1, E2, E3 e E4) e os valores de dureza Brinell e Janka, aqui tomados como referenciais teóricos. As durezas do durômetro portátil serão assumidas como variáveis independentes e a dureza Brinell e Janka serão assumidas como variáveis dependentes. Ainda nessa etapa será estudada a sensibilidade do equipamento às variações de densidade observadas entre os lotes de madeira amostrados, buscando a diferenciação entre espécies e entre lenhos (de cerne e alburno).

Toda a análise foi conduzida com a assessoria do Prof. Dr. Carlos Roberto Padovani, do Departamento de Bioestatística – IBB/UNESP – Botucatu.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Estudo exploratório

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios-piloto para quantificação da energia mobilizada na cravação da esfera na madeira pelo método Brinell de determinação da dureza.

Tabela 9 - Dados gerais obtidos nos ensaios-piloto de dureza Brinell

Amostra	Espécie (s)	Carga endent (kgf)	Veloc. endent (mm/min)	Energia média endent (kgf.mm)	Endent. média (mm)	Tempo médio ensaio (s)
1	<i>Nectandra</i> sp. &	50	0,25	15,1	4,0	160
			0,50	15,0	4,0	80
			1,00	14,2	4,0	38
2	<i>Qualea</i> sp. (4 repetições/ Espécie)	100	0,25	50,4	5,0	270
			0,50	51,4	5,0	140
			1,00	50,8	5,0	70
3	<i>Eucalyptus citriodora</i>	50	0,25	9,3	3,0	100
			0,50	9,6	3,0	50
			1,00	8,8	3,0	25
4	<i>Eucalyptus citriodora</i>	100	0,25	32,6	4,0	165
			0,50	32,5	4,0	80
			1,00	32,3	4,0	45

Verifica-se que a energia de endentação variou de aproximadamente 9 kgf.mm a 52 kgf.mm para as espécies estudadas. Esses dados abonaram a idéia inicial de mobilização desse nível de energia pela queda de uma massa compatível com equipamento portátil. De fato, partindo-se de uma massa de pequeno valor (1kg ou 2kg), as alturas de queda da massa necessárias à mobilização desses níveis de energia estariam compatíveis com o propósito de desenvolvimento de equipamento portátil (no caso específico, para massa de 1kg, as alturas de queda resultariam em 9 mm e 52 mm, respectivamente).

Constatou-se, também, que não houve variação sensível do valor da energia demandada em função da velocidade de endentação. Por fim, como poderia ser esperado, o tempo do ensaio foi inversamente proporcional à velocidade de endentação.

No tocante à relação entre o diâmetro da calota endentada e o diâmetro do endentador, ela se situou na faixa de 0,3 a 0,5. Considerando-se o reportado na revisão bibliográfica (calota endentada com diâmetro variando de 30% a 60% do diâmetro do endentador - $0,3D < d < 0,6D$) e, ainda, a possibilidade de realização de medições em madeiras com dureza superior às encontradas nessa fase do estudo, decidiu-se por trabalhar com energia de endentação mínima de 100kgf.mm.

6.2 Projeto do equipamento

O projeto do equipamento foi desenvolvido com as seguintes premissas:

- equipamento com carga de endentação fixa e posterior avaliação da superfície endentada, com uso de lupa graduada (metodologia semelhante à Brinell).
- endentação por queda livre de massa
- diâmetro do endentador de 10 mm
- energia de endentação mínima de 100kgf.mm.

O projeto completo do equipamento está apresentado no Anexo A.

Resultou em equipamento constituído por haste principal de aço, com comprimento de 544 mm e diâmetro de 10 mm, na qual se conectavam, nas duas extremidades opostas, a ponteira (endentador) e o punho, para manuseio e posicionamento do durômetro. Ao longo da haste principal, entre a ponteira e o punho, movimenta-se uma massa (de 1kg ou de 2 kg), que

pode ter o curso de movimentação limitado por um anel de posicionamento. O equipamento foi fabricado com aço SAE 1045, com acabamento geral de 6.3 e 12.5 microns (μm) com posterior galvanização, apenas para a confecção do punho foi utilizado o alumínio, para se evitar possível corrosão. Uma chave tipo Allen M6x1x9 compõe o equipamento para a substituição dos pesos, quando necessário.

A Figura 24 ilustra o equipamento e a forma de obtenção da endentação na madeira.



Figura 24 - Vista geral do Durômetro portátil para madeiras (esquerda) e dos detalhes da ponteira (direita).



Figura 25 - Esquema geral de endentação da ponteira na madeira, com a utilização de carbono para ressaltar o contorno da calota esférica endentada.

Pode-se citar como vantagens principais do equipamento a sua funcionalidade e seu baixo custo. O durômetro revelou-se leve, de fácil transporte e operação, possibilitando medições rápidas da dureza. O preço final do conjunto (durômetro + lupa graduada) foi de R\$ 540,00, sendo que o durômetro propriamente dito custou R\$ 165,00.

Como desvantagens pode-se citar a dificuldade de leitura tendo em vista o acabamento da superfície das peças a serem avaliadas, a precisão da leitura e a diferença entre os dois diâmetros lidos. Durante os ensaios, foi observado a presença do fenômeno aqui caracterizado como “repique”, que consistia no ricochete do indentador, causando uma endentação suplementar à calota inicialmente conformada, quando da queda livre de massas maiores. Esse fenômeno provoca uma dificuldade adicional na mensuração dos diâmetros de endentação.

Os diâmetros obtidos nos ensaios foram praticamente iguais, revelando que a diferença na madeira se dá pela variação interna de sua estrutura anatômica.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados gerais dos ensaios para avaliação da repetitividade de leituras do durômetro portátil para madeira.

A Tabela 11 apresenta os intervalos de confiança da média (95%) obtidos à partir da avaliação da repetitividade. Nota-se que a menor variação estabelecida entre os ensaios realizados com o durômetro desenvolvido ficou para E2 com o intervalo de $1,28\% \leq CV_{E2} \leq 3,88\%$, seguido pelo intervalo de E3 de $1,41\% \leq CV_{E3} \leq 4,31\%$.

Tabela 10 – Resultados gerais do ensaio de repetitividade do durômetro portátil para madeira

repetições	HB	Diam endentado (mm)			E1	Diam endentado (mm)			E2	Diam endentado (mm)			E3	Diam endentado (mm)			E4
		paral	norm	média		paral	Norm	média		paral	norm	média		paral	norm	média	
1	123	2,60	2,70	2,65	17,81	3,50	3,50	3,50	20,13	3,50	3,40	3,45	20,74	4,20	4,30	4,25	26,86
2	123	2,70	2,70	2,70	17,14	3,50	3,50	3,50	20,13	3,40	3,40	3,40	21,37	4,20	4,20	4,20	27,54
3	123	2,70	2,70	2,70	17,14	3,50	3,50	3,50	20,13	3,60	3,50	3,55	19,55	4,00	4,10	4,05	29,72
4	123	2,70	2,80	2,75	16,51	3,40	3,40	3,40	21,37	3,50	3,40	3,45	20,74	4,00	4,00	4,00	30,50
5	121	2,70	2,80	2,75	16,51	3,50	3,50	3,50	20,13	3,50	3,50	3,50	20,13	4,10	4,10	4,10	28,97
6	123	2,70	2,80	2,75	16,51	3,50	3,40	3,45	20,74	3,50	3,50	3,50	20,13	4,20	4,20	4,20	27,54
7	125	2,80	2,80	2,80	15,92	3,40	3,40	3,40	21,37	3,60	3,50	3,55	19,55	4,20	4,10	4,15	28,24
8	121	2,80	2,90	2,85	15,35	3,50	3,50	3,50	20,13	3,40	3,50	3,45	20,74	4,20	4,10	4,15	28,24
9	123	2,70	2,70	2,70	17,14	3,50	3,50	3,50	20,13	3,50	3,50	3,50	20,13	4,00	4,10	4,05	29,72
10	123	2,60	2,70	2,65	17,81	3,50	3,50	3,50	20,13	3,40	3,50	3,45	20,74	4,20	4,40	4,30	26,21
média	122,80				16,78				20,44				20,38				28,35
des. Pad.	1,1353				0,7822				0,5269				0,58382				1,3715
C.V. (%)	0,92				4,66				2,58				2,86				4,84

Tabela 11 – Intervalo de confiança dos coeficientes de variação das durezas Brinell e E1 a E4

grandeza	Intervalo de confiança (95%) do coeficiente de variação
HB	$0,46\% \leq CV \leq 1,38\%$
E1	$2,30\% \leq CV \leq 7,02\%$
E2	$1,28\% \leq CV \leq 3,88\%$
E3	$1,41\% \leq CV \leq 4,31\%$
E4	$2,39\% \leq CV \leq 7,29\%$

6.3 Ensaio de calibração do equipamento

Foram realizados os ensaios em 16 lotes com a madeira na umidade de recebimento, num total de 192 corpos-de-prova. Os resultados obtidos encontram-se documentados no Anexo B.

Na Tabela 12 são apresentados valores representativos das grandezas mensuradas. Para todas as durezas avaliadas o coeficiente de variação (c.v.) resultou dentro dos padrões normalmente observados para a madeira, ou seja, de 10% a 20%. O maior coeficiente de variação foi observado na dureza Janka.

Os lotes 1, 2 e 5, de *E. citriodora* com predominância de cerne, apresentaram valores de densidades médias, calculada no teor de umidade de recebimento, entre 1,08 e 1,11 g/cm³; a umidade média de recebimento variou de 35,33 a 50,88%; as durezas Janka médias obtidas variaram de 52,37 a 66,23 MPa e a resistência a compressão paralela média variou entre 40,53 e 57,20 MPa.

No lote 3, de *Goupia glabra* (Cupiúba), foram observados valores médios de densidade de 1,13 g/cm³ para umidade média de recebimento de 55,35% com dureza Janka média de 52,26 MPa e resistência à compressão paralela média de 43,45 MPa.

O lote 4, de *E. saligna*, apresentou densidade média de 0,87 g/cm³ para umidade média de recebimento de 37,21% com dureza Janka média de 34,79 MPa e resistência à compressão paralela média de 36,40 MPa.

O lote 7, de *E. teriticornis*, apresentou densidade média de 1,14 g/cm³ para umidade média de recebimento de 41,45% com dureza Janka média de 72,38 MPa e resistência à compressão paralela média de 34,04 MPa.

Para o lote 8 de *E. urophylla*, foram observados valores médios de densidade de 1,05 g/cm³ para umidade média de recebimento de 51,97% com dureza Janka média de 51,77 MPa e resistência à compressão paralela média de 38,55 MPa.

Para os lotes de *E. citriodora*, 9 e 11 com predominância de alburno e 10 e 12 com predominância de cerne, foram obtidos valores médios de densidade entre 1,13 e 1,18 g/cm³, a umidade média foi verificada entre 36,12 e 45,36%, as durezas Janka variaram de 71,54 e 81,13 MPa, para a resistência à compressão paralela os valores obtidos ficaram entre 43,35 e 56,61 MPa.

O lote 13, de *Bagassa guianenses* (Tatajuba), apresentou densidade máxima de 0,99g/cm³ para umidade de recebimento um mínimo de 14,31% com dureza Janka média de 83,91 MPa e resistência à compressão paralela média de 67,38 MPa.

O *E. grandis* observado no lote 6 apresentou densidade média de 1,16 g/cm³ para umidade média de 45,25% e dureza Janka média 65,07 MPa e resistência à compressão normal média de 48,56MPa. Os lotes 14, 15 e 16 da mesma espécie, com idade comprovada de 6 anos apresentaram densidades médias variando entre 0,66 e 0,73g/cm³ com umidade média de 63,47% e dureza Janka média entre 17,79 e 21,40 MPa e resistência à compressão paralela médias entre 23,48 e 25,99 MPa.

Todos os lotes foram amostrados na densidade aparente na umidade de recebimento.

Tabela 12 - Valores representativos das grandezas mensuradas.

Lote	valores	Densidade (g/cm ³)	U (%)	f _{li} (MPa)	HB	E1 E2 E3 E4				f _{co} (MPa)
						(kgf/mm)				
1	médio	1,11	57,8	56,89	3,19	4,01	5,38	4,89	6,98	40,53
	mínimo	1,08	52,1	47,46	2,56	3,12	4,61	4,30	5,57	34,08
	máximo	1,20	64,8	72,46	3,94	4,86	6,37	6,61	8,04	46,25
	d.pad	0,04	4,4	7,59	0,42	0,46	0,41	0,59	0,73	3,38
	C.V. (%)	3,39	7,7	13,35	13,18	11,40	7,54	12,02	10,47	8,35
2	médio	1,08	50,9	52,37	2,86	3,49	5,19	4,95	7,50	41,39
	mínimo	1,01	41,0	42,13	2,39	2,85	4,69	4,30	6,69	35,43
	máximo	1,16	58,2	61,13	3,31	3,79	5,80	5,60	8,32	44,98
	d.pad	0,05	5,8	6,55	0,28	0,24	0,43	0,34	0,43	2,55
	C.V. (%)	4,44	11,4	12,50	9,63	6,91	8,22	6,78	5,67	6,16
3	médio	1,13	55,4	52,26	3,08	4,03	5,47	4,79	6,71	43,45
	mínimo	1,05	41,9	39,07	2,35	3,12	4,69	4,02	5,95	30,99
	máximo	1,20	60,7	62,89	3,71	4,86	6,49	5,21	7,52	52,10
	d.pad	0,04	5,6	8,95	0,38	0,51	0,57	0,34	0,44	5,38
	C.V. (%)	3,38	10,1	17,12	12,32	12,71	10,46	7,14	6,50	12,38
4	médio	0,87	37,2	34,79	2,33	3,03	4,48	4,14	6,35	36,40
	mínimo	0,70	25,5	22,72	1,67	2,43	3,58	3,13	5,11	28,63
	máximo	1,07	47,2	46,71	3,64	3,94	5,12	5,40	8,04	47,32
	d.pad	0,13	7,2	7,77	0,48	0,43	0,49	0,59	0,95	5,22
	C.V. (%)	15,02	19,3	22,34	20,58	14,32	10,82	14,29	14,91	14,34
5	médio	1,08	35,3	66,23	3,58	4,30	6,22	5,51	8,01	57,20
	mínimo	1,04	29,1	55,40	2,70	3,64	5,30	4,69	7,15	44,31
	máximo	1,12	46,5	77,86	4,46	6,09	7,42	7,28	9,06	67,14
	d.pad	0,02	5,5	8,33	0,57	0,71	0,71	0,72	0,58	7,44
	C.V. (%)	2,31	15,6	12,58	16,02	16,58	11,40	13,15	7,25	13,00

Tabela 12 - Valores representativos das grandezas mensuradas (continuação).

Lote	valores	Densidade (g/cm ³)	U (%)	f _H (MPa)	HB	E1 E2 E3 E4				f _{co} (MPa)
						(kgf/mm)				
6	médio	1,16	45,2	65,07	3,41	4,02	6,08	5,56	7,87	46,56
	mínimo	1,13	42,4	50,87	2,80	3,57	5,30	5,03	6,92	41,62
	máximo	1,19	53,4	73,49	3,86	4,46	7,88	6,02	8,91	51,93
	d.pad	0,02	3,1	8,26	0,36	0,24	0,79	0,32	0,66	2,91
	C.V. (%)	1,38	6,9	12,70	10,43	6,05	13,06	5,76	8,41	6,26
7	médio	1,14	41,5	72,38	3,53	4,43	6,52	6,00	7,91	34,04
	mínimo	1,06	38,3	65,08	2,85	3,71	5,40	4,94	7,15	28,76
	máximo	1,22	44,9	79,67	4,37	5,07	7,57	7,42	8,61	40,79
	d.pad	0,05	2,3	4,56	0,52	0,39	0,81	0,78	0,49	4,36
	C.V. (%)	4,14	5,5	6,30	14,87	8,72	12,39	13,07	6,17	12,80
8	médio	1,05	52,0	51,77	2,72	3,80	5,57	4,94	6,80	38,55
	mínimo	0,98	37,5	30,87	1,91	2,80	4,77	3,76	5,29	32,11
	máximo	1,11	67,0	68,68	3,43	5,68	7,00	6,49	7,78	47,29
	d.pad	0,05	9,5	12,79	0,51	0,70	0,76	0,77	0,73	4,76
	C.V. (%)	4,40	18,3	24,71	18,91	18,54	13,69	15,67	10,78	12,36
9	médio	1,16	36,1	81,13	4,20	4,83	7,42	6,74	9,24	57,02
	mínimo	1,09	26,3	60,92	2,70	4,02	6,74	6,02	7,78	51,06
	máximo	1,22	49,0	101,30	4,86	5,43	8,55	7,57	10,24	64,73
	d.pad	0,04	6,2	11,55	0,70	0,43	0,53	0,52	0,73	4,02
	C.V. (%)	3,50	17,0	14,24	16,59	8,97	7,12	7,72	7,88	7,06
10	médio	1,18	35,6	80,74	4,28	4,92	7,38	6,44	9,75	56,61
	mínimo	1,06	28,2	68,14	3,57	3,94	6,13	5,40	8,91	48,65
	máximo	1,26	41,4	102,60	5,19	5,95	8,55	7,42	10,99	67,80
	d.pad	0,05	4,0	8,71	0,58	0,62	0,85	0,70	0,62	6,04
	C.V. (%)	4,63	11,4	10,79	13,44	12,58	11,57	10,82	6,31	10,67
11	médio	1,16	45,4	71,54	3,72	4,40	6,59	5,79	8,44	52,02
	mínimo	1,03	32,0	54,51	2,85	3,12	5,12	4,61	7,04	44,70
	máximo	1,22	54,1	90,27	5,07	5,30	8,55	7,57	9,38	57,91
	d.pad	0,06	7,2	12,24	0,62	0,70	1,02	0,93	0,82	4,62
	C.V. (%)	5,43	15,9	17,10	16,77	16,02	15,48	16,12	9,76	8,88
12	médio	1,13	43,6	77,86	3,81	4,49	6,23	6,01	8,98	49,00
	mínimo	1,03	34,7	64,57	3,37	3,71	5,40	5,03	7,15	38,27
	máximo	1,20	51,4	91,08	4,65	5,30	6,74	6,74	9,88	61,89
	d.pad	0,05	5,8	9,88	0,42	0,50	0,42	0,53	0,73	8,43
	C.V. (%)	4,86	13,4	12,69	10,98	11,25	6,78	8,77	8,11	17,20
13	médio	0,92	17,2	83,91	4,45	4,33	6,42	5,90	8,24	67,38
	mínimo	0,82	14,3	62,78	3,50	3,57	5,21	5,03	7,04	60,39
	máximo	0,99	23,4	97,47	5,30	5,19	6,87	6,61	9,54	81,85
	d.pad	0,06	2,2	11,87	0,60	0,53	0,59	0,59	0,85	6,86
	C.V. (%)	6,85	12,9	14,14	13,47	12,31	9,23	10,03	10,27	10,18
14	médio	0,73	78,7	21,58	1,55	2,28	3,43	3,39	4,36	23,48
	mínimo	0,59	43,1	17,17	1,15	1,94	2,98	2,56	3,27	20,31
	máximo	0,89	106,0	26,79	1,88	2,96	4,30	4,94	5,20	26,97
	d.pad	0,09	18,4	3,26	0,26	0,29	0,40	0,74	0,57	2,13
	C.V. (%)	12,32	23,4	15,11	16,98	12,60	11,57	21,94	13,12	9,06
15	médio	0,66	63,5	21,40	1,62	2,33	3,63	3,36	4,74	23,72
	mínimo	0,59	46,0	15,97	1,26	2,01	2,98	2,93	3,70	19,00
	máximo	0,81	95,0	38,46	2,05	2,75	4,16	3,95	5,95	25,99
	d.pad	0,08	16,3	5,91	0,23	0,25	0,38	0,37	0,76	1,96
	C.V. (%)	11,60	25,7	27,62	14,42	10,96	10,50	11,02	16,08	8,27
16	médio	0,68	75,6	17,79	1,43	2,30	3,45	3,18	4,47	23,55
	mínimo	0,58	51,0	14,89	0,97	1,88	2,56	2,30	3,08	20,88
	máximo	0,86	126,0	22,66	1,67	2,80	4,53	3,82	6,16	25,30
	d.pad	0,10	24,2	2,46	0,22	0,33	0,61	0,52	1,05	1,29
	C.V. (%)	13,95	32,0	13,81	15,32	14,48	17,69	16,26	23,59	5,46

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do teste de Tukey, realizado para comparação das grandezas densidade, umidade, dureza Janka, dureza Brinell e resistência à compressão paralela às fibras entre os 16 lotes estudados.

Tabela 13 – Resultados do teste de comparação de médias das grandezas densidade, umidade, dureza Janka, dureza Brinell e resistência à compressão entre os lotes estudados

Lote	Densidade (g/cm ³)	Umidade (%)	f _H (MPa)	HB (kgf/mm ²)	f _{c0} (MPa)
1	1,11	57,8	56,89 b	3,19 cd	40,53 bc
2	1,08	50,9	52,37 b	2,86 bcd	41,39 bc
3	1,13	55,4	52,26 b	3,08 cd	43,45 bcd
4	0,87	37,2	34,79 a	2,33 b	36,40 b
5	1,08	35,3	66,23 bc	3,58 defg	57,20 e
6	1,16	45,2	65,07 bc	3,41 cde	46,56 cd
7	1,14	41,5	72,38 cd	3,53 def	34,04 b
8	1,05	52,0	51,77 b	2,72 bc	38,55 b
9	1,16	36,1	81,13 d	4,20 fh	57,02 e
10	1,18	35,6	80,74 d	4,28 gh	56,61 de
11	1,16	45,4	71,54 cd	3,72 efg	52,02 de
12	1,13	43,6	77,86 cd	3,81 efgh	49,00 d
13	0,92	17,2	83,91 d	4,45 h	67,38 f
14	0,73	78,7	21,58 a	1,55 a	23,48 a
15	0,66	63,5	21,40 a	1,62 a	23,72 a
16	0,68	75,5	17,79 a	1,43 a	23,55 a

Notas:

- 1) letras minúsculas comparam valores médios dos lotes
- 2) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente (p>0,05)

Como poderia ser esperado, os lotes 14, 15 e 16 apresentaram as menores densidades, como consequência de suas idades, relativamente inferiores às dos demais lotes.

Constata-se, também, que à exceção do lote 13 – *Bagassa guianensis* (Tatajuba), todos os lotes apresentaram umidades médias superiores a 35%, caracterizando madeira verde, com umidade acima do PSF – Ponto de saturação das fibras. Com essa situação, nota-se que a amostragem atendeu a um dos pressupostos gerais do trabalho, qual seja ensaiar lotes de madeira verde, que é a condição geralmente observada no momento da caracterização mecânica do material para dormentes, o que ocorre logo após o seu desdobro.

Na Tabela 14 são apresentados os testes de Tukey para comparação das médias entre os ensaios de dureza realizados com o durômetro portátil para madeiras (E1 a E4).

Tabela 14 - Resultados do teste de comparação de médias das durezas E1 a E4 entre os lotes estudados

Lote	E1	E2	E3	E4
	(kgf/mm)	(kgf/mm)	(kgf/mm)	(kgf/mm)
1	4,01 Acd	5,38 Bcd	4,89 Bbc	6,98 Cbcd
2	3,49 Abc	5,19 Bcd	4,95 Bbc	7,50 Ccde
3	4,03 Acd	5,47 Ccd	4,79 Bbc	6,71 Dbc
4	3,03 Aab	4,48 Bbc	4,14 Bab	6,35 Dde
5	4,30 Ade	6,22 Cdef	5,51 Bcd	8,01 Dde
6	4,02 Acd	6,08 Bdef	5,56 Bcd	7,87 Cde
7	4,43 Ade	6,52 Bfg	6,00 Bde	7,91 Cde
8	3,80 Acd	5,57 Bcde	4,94 Bc	6,80 Cbc
9	4,83 Ae	7,42 Cg	6,74 Be	9,24 Dgh
10	4,92 Ae	7,38 Cg	6,44 Bde	9,75 Dh
11	4,40 Ade	6,59 Cfg	5,79 Bcde	8,44 Defg
12	4,49 Ade	6,23 Bdef	6,01 Bde	8,98 Cfgh
13	4,33 Ade	6,42 Cef	5,90 Bde	8,24 Def
14	2,28 Aa	3,43 Ba	3,39 Ba	4,36 Ca
15	2,33 Aa	3,63 Bab	3,36 Ba	4,74 Ca
16	2,30 Aa	3,45 Ba	3,18 Ba	4,47 Ca

Notas:

- 1) letras minúsculas compararam valores médios dos lotes
- 2) letras maiúsculas comparam valores médios das durezas (E1 a E4)
- 3) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$)

Da análise da tabela evidencia-se, no geral, a proximidade dos valores para as durezas E2 e E3, no geral com valores superiores aos observados para dureza E1 e inferiores aos obtidos para dureza E4. A igualdade estatística entre E2 e E3 foi verificada nos

lotes 1, 2, 4, 6, 7, 8, 12, 14, 15 e 16. Esse comportamento era esperado, na medida em que as durezas E2 e E3 utilizam-se da mesma energia de endentação(200 kgf.mm).

Comparando-se os resultados anotados nas Tabelas 13 e 14, com enfoque nos grupamentos (a, b, c ...) definidos pelo teste de comparação de médias, pode-se observar a grande semelhança obtida para a classificação dos lotes promovida pela dureza Janka (f_H) e pelas durezas E2 e E3. Em particular, nota-se que a dureza E3 teve, nesse contexto, desempenho superior à dureza E2.

Nas classificações em grupamentos com ordem crescente de desempenho (das menores para as maiores durezas), as durezas Janka e E3 promoveram a seleção dos lotes 14, 15, 16 e 4 como os de menores durezas, seguidos pelos lotes 1, 2, 3, 5, 6 e 8 num segundo grupamento e 7, 9, 10, 11, 12 e 13 num terceiro grupamento.

Constata-se também a semelhança nos lotes de dureza Janka e E2, entretanto em menor grau que a observada para a dureza Janka e E3.

Das tabelas 13 e 14, observou-se que a dureza Janka variou de um valor mínimo de 17,79 MPa a um valor máximo de 83,91 MPa, equivalente a 4,7 vezes o valor mínimo. Nos valores obtidos para E2 a variação foi de um valor mínimo de 3,43 kgf/mm a um valor máximo de 7,42 kgf/mm, equivalente a 2,16 vezes o menor valor. Esses valores extremos de dureza E2 corresponderam a variações de leitura do diâmetro de endentação (com a lupa graduada) de aproximadamente 2mm. Igual análise, conduzida para os valores de E3, leva a variações de dureza de 3,18 kgf/mm a 6,74 kgf/mm, ou seja, 2,12 vezes o menor valor), o que corresponde a variação de leitura do diâmetro de endentação de aproximadamente de 1,25 mm. Essa constatação constitui-se numa limitação do processo, na medida em que, além de apresentar menor espectro de variação dos valores de dureza (tanto E2 quanto E3), os valores limites observados corresponderam a variações muito pequenas no diâmetro de endentação.

Buscando novas formas de análise, procurou-se agrupar lotes de madeira com afinidade. Assim, considerando-se a espécie e a idade como quesitos principais do agrupamento, no grupo I foram reunidos os lotes 1, 2, 5, 10 e 12, que representam o grupo da madeira de *E. citriodora* obtida de árvores mais velhas, onde se esperava exclusividade ou predominância de cerne. Os grupos II a VI permaneceram, respectivamente, com os lotes 3, 4, 6, 7 e 8. De maneira análoga, o grupo VIII permaneceu com o lote 13, da *Bagassa guianensis*.

O grupo VII reuniu os lotes 9 e 11, representando a madeira de *E. citriodora* de árvores velhas, mas com predominância de alborno. Por fim, o grupo IX reuniu os lotes 14 a 16, com madeira de *E. grandis* obtida de árvores jovens, com idade média de 6 anos.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os valores dessa análise para as propriedades mensuradas.

Da análise dos resultados apresentados nas Tabelas 15 e 16 pode-se concluir, analogamente ao já apresentado, pela semelhança de resultados de classificação promovidos pelas durezas Janka e E3.

Tabela 15 – Resultados do teste de comparação de médias das grandezas densidade, umidade, dureza Janka, dureza Brinell e resistência à compressão entre os grupos, obtidos pela associação de lotes

Grupo (lotes agrupados)	Densidade (g/cm ³)		Umidade (%)		f _H (MPa)		HB (kgf/mm ²)		f _{c0} (MPa)	
	Valor	Letras	Valor	Letras	Valor	Letras	Valor	Letras	Valor	Letras
I (1,2,5, 10 e12)	1,12	d	44,63	bc	66,81	d	3,54	de	48,94	cd
II (3)	1,13	d	55,33	c	52,25	c	3,08	cd	43,45	bc
III (4)	0,87	b	37,20	b	34,78	b	2,33	b	36,39	b
IV (6)	1,16	d	45,26	bc	65,06	d	3,41	de	46,56	c
V (7)	1,14	d	41,45	bc	72,38	de	3,53	de	34,04	b
VI (8)	1,04	c	51,97	c	51,77	c	2,72	bc	38,55	bc
VII (9 e 11)	1,16	d	40,74	bc	76,34	ef	3,96	ef	54,52	d
VIII (13)	0,92	b	17,23	a	83,91	f	4,45	f	67,38	e
IX (14, 15 e 16)	0,69	a	72,59	d	20,26	a	1,53	a	23,58	a

Notas:

- 1) letras minúsculas comparam valores médios dos grupos
- 2) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente (p>0,05)

Tabela 16 - Resultados do teste de comparação de médias das durezas E1 a E4 entre os grupos, obtidos pela associação de lotes

Grupo (lotes agrupados)	(kgf/mm)			
	E1	E2	E3	E4
I (1,2,5,10 e12)	4,24 Acd	6,08 Cc	5,56 Bde	8,24 Dd
II (3)	4,03 Ac	5,47 Cc	4,79 Bbc	6,70 Dbc
III (4)	3,02 Ab	4,48 Bb	4,14 Bb	6,35 Cb
IV (6)	4,02 Ac	6,08 Bc	5,56 Bde	7,87 Ccd
V (7)	4,43 Acd	6,52 Bcd	6,00 Be	7,91 Ccd
VI (8)	3,80 Ac	5,57 Bc	4,94 Bcd	6,80 Cbc
VII (9 e 11)	4,61 Ad	7,00 Cd	6,27 Be	8,84 Dd
VIII (13)	4,33 Acd	6,42 Ccd	5,90 Be	8,24 Dd
IX	2,30 Aa	3,50 Ba	3,31 Ba	4,52 Ca

Notas:

- 1) letras minúsculas compararam valores médios dos grupos
- 2) letras maiúsculas comparam valores médios das durezas (E1 a E4)
- 3) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0,05$)

Por fim, foram estudadas as correlações existentes entre as durezas mensuradas. Os estudos contemplaram a avaliação da normalidade dos resíduos das regressão, com o teste de Shapiro, e foram estudadas para num nível de significância de 5%.

Na Figura 26 registra-se, inicialmente, a regressão linear obtida entre os valores da Dureza Brinell e os de dureza Janka, ambos obtidos a partir dos ensaios na máquina universal de ensaios apresentando coeficiente de determinação (R^2) de 0,8694.

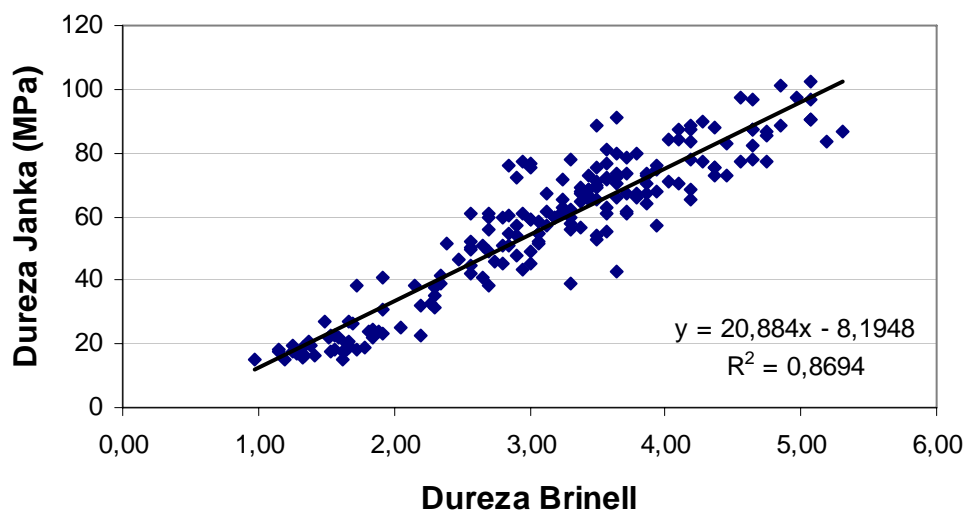


Figura 26 - Regressão linear entre os valores das durezas Brinell e Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.

Os resultados aqui obtidos estão perfeitamente condizentes com aqueles reportados na revisão bibliográfica. No estudo da mesma correlação, Bektas *et al.* (2001) encontraram coeficientes de determinação da regressão linear igual a 0,83.

Nas figuras 27 e 28 estão registradas as correlações entre as durezas E1 a E3 e a dureza Janka, referência principal nos estudos aqui conduzidos. A regressão da dureza E4 com dureza Janka não teve a normalidade dos resíduos confirmada pelo teste estatístico de Shapiro.

Observa-se que todas as relações resultaram com coeficiente de determinação superior a 0,77, que pode ser considerado bom. Coube novamente destaque à dureza E3, na medida em que a relação dela com a dureza Janka foi a melhor dentre as estudadas.

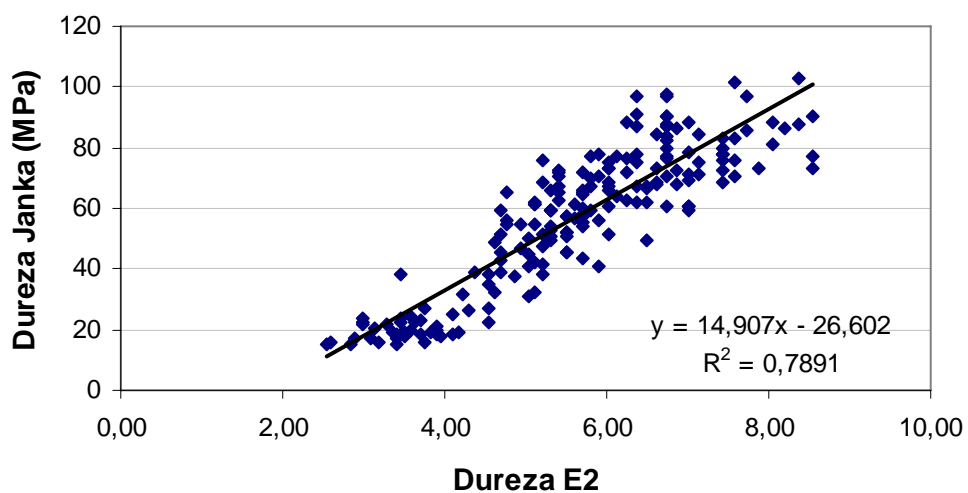
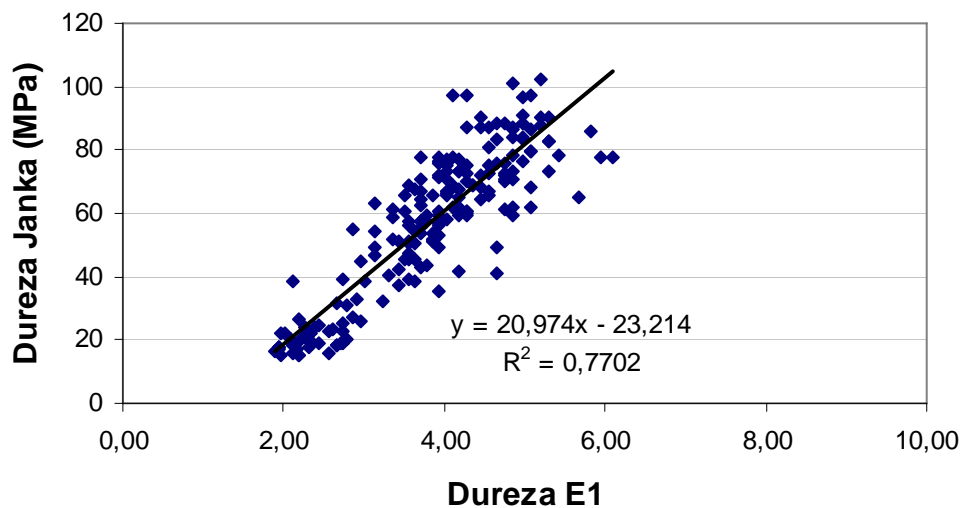


Figura 27 - Regressão linear entre os valores das durezas E1 e E2 e a dureza Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.

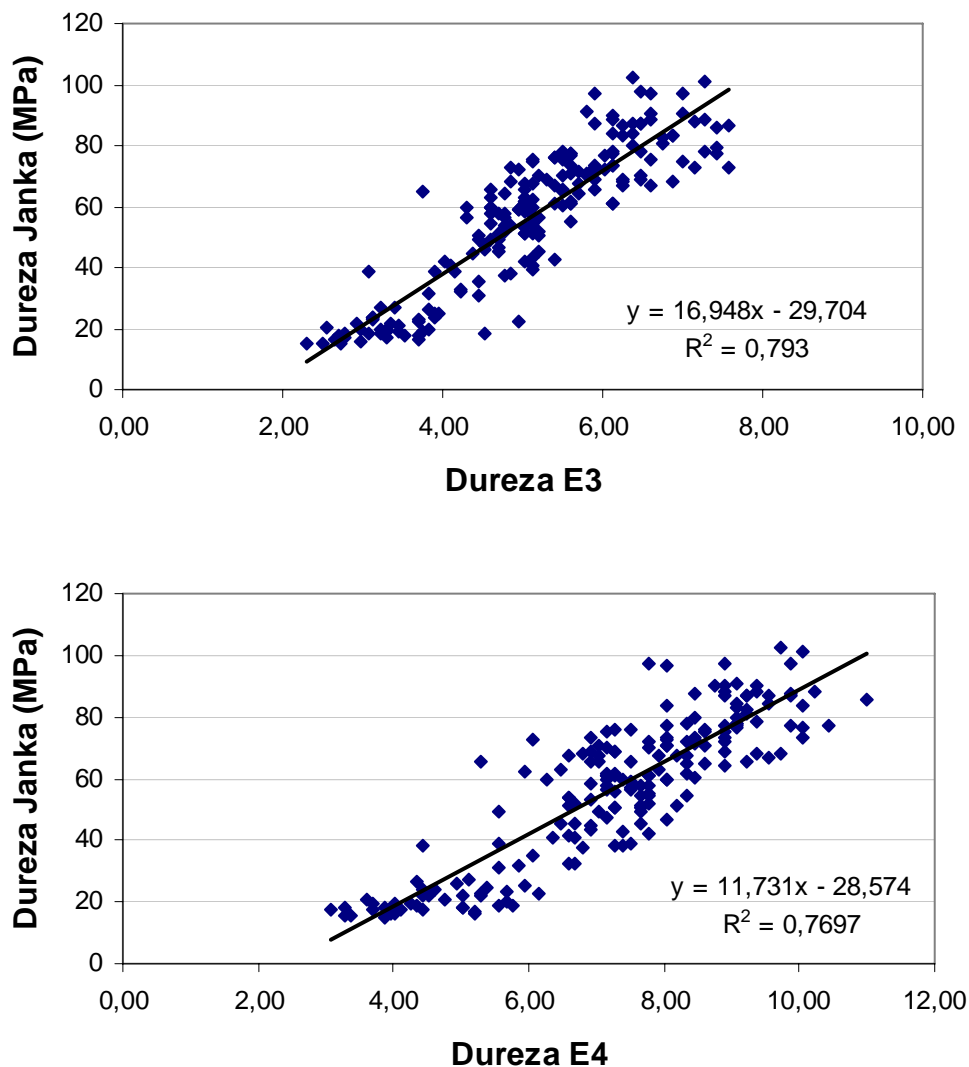


Figura 28 - Regressão linear entre os valores das durezas E3 e E4 e a dureza Janka obtida a partir dos resultados mensurados nos lotes.

Dessa forma, pelos resultados obtidos e considerando-se que as relações de regressão resultaram com coeficientes de determinação superiores a 70%, assumidos normalmente como referencial mínimo para as pesquisas na área de Ciência e Tecnologia da Madeira pelo grupo do Laboratório de Ensaio de Materiais – FCA/UNESP, pode-se concluir pela pertinência do uso do durômetro portátil para madeiras para inferir a dureza Janka.

A partir da equação de regressão da dureza E2 com dureza Janka (Figura 27), pode-se obter os valores de durezas E2 que corresponderiam às durezas Janka de

50MPa, 40MPa e 30MPa, tidas como uma das exigências para classificação das madeiras para dormentes (1ª classe, 2ª classe e 3ª classe), conforme já apresentado na Tabela 1.

Assim, para a análise da dureza E2 correspondente a uma dureza Janka de 50 MPa, a equação de regressão forneceu o valor de E2 igual a 5,139 kgf/mm. Analogamente, para os valores de dureza Janka de 40MPa e 30MPa, obtiveram-se valores de dureza E2 iguais a 4,468 kgf/mm e 3,797 kgf/mm, respectivamente.

Usando-se os valores assumidos de E2 como limites para as três situações, foram quantificados os corpos-de-prova que atendiam às metas estabelecidas, quais sejam, $f_H \geq 50$ MPa, $40\text{MPa} \leq f_H < 50\text{MPa}$ e $30\text{MPa} \leq f_H < 40\text{MPa}$.

Análise semelhante foi conduzida para os valores das durezas E3 e E4 obtidos pelas equações de regressão da Figura 28.

As Tabelas 17 e 18 resumem os resultados obtidos para as duas durezas (E2 e E3, respectivamente).

Tabela 17 - Resultados da classificação dos corpos-de-prova em classes, a partir de valores característicos da dureza Janka, inferidos pela relação de regressão com a dureza E2.

1	2	3	4	5	6
Classe	Meta para a Dureza Janka (MPa)	Dureza E2 corresponde à meta (kgf/mm) Valores estimados pela regressão	Quantidade de c.p. selecionados pela dureza E2 (a partir da exigência da coluna 3)	Quantidade de c.p. que atingiram a meta (expressa na coluna 1)	Acerto (%) Obtido pela relação de valores das colunas 5 e 4
1	$f_H \geq 50$	$E2 \geq 5,139$	126	117	92,8
2	$40 \leq f_H < 50$	$4,468 \leq E2 < 5,139$	21	17	81,0
3	$30 \leq f_H < 40$	$3,797 \leq E2 < 4,468$	17	6	35,3
4	$f_H < 30$	$E2 < 3,797$	28	27	96,4

Tabela 18 - Resultados da classificação dos corpos-de-prova em classes, a partir de valores característicos da dureza Janka, inferidos pela relação de regressão com a dureza E3.

1	2	3	4	5	6
Classe	Meta para a Dureza Janka (MPa)	Dureza E3 corresponde à meta (kgf/mm) Valores estimados pela regressão	Quantidade de c.p. selecionados pela dureza E3 (a partir da exigência da coluna 3)	Quantidade de c.p. que atingiram a meta (expressa na coluna 1)	Acerto (%) Obtido pela relação de valores das colunas 5 e 4
1	$f_H \geq 50$	$E3 \geq 4,703$	125	116	92,8
2	$40 \leq f_H < 50$	$4,113 \leq E3 < 4,703$	25	19	76,0
3	$30 \leq f_H < 40$	$3,523 \leq E3 < 4,113$	15	5	33,0
4	$f_H < 30$	$E3 < 3,523$	27	26	96,3

Nota-se que, nos dois casos, as durezas E2 e E3, avaliadas com o durômetro portátil para madeiras, tiveram um acerto de 92,8%, quando o objetivo era selecionar madeiras com dureza Janka igual ou superior a 50 MPa. Igual análise, para a seleção de durezas Janka entre 40 MPa e 50 MPa (aqui denominada classe 2), leva a um acerto de 81,0% quando a mensuração é de dureza E2 e 76,0%, quando a mensuração é de dureza E3.

Para as duas últimas classes (classes 3 e 4), os percentuais de acerto foram bastante variáveis, tanto nos casos de E2 quanto de E3. Assim, para a classe 3, o percentual de acerto ficou em aproximadamente 35% quando da avaliação das durezas E2 e E3, e 96% para a classe 4.

Entende-se, contudo, que a maior justificativa de uso do equipamento se daria em condições de segregação de madeiras de categorias superiores, com o objetivo claro de separá-las das categorias inferiores. Nessas situações o equipamento se comportou com um percentual de acerto elevado, que o habilita para esse emprego.

7. CONCLUSÕES

A partir da interpretação dos dados obtidos no programa experimental aqui desenvolvido, as conclusões principais do trabalho são:

- de que a dureza Brinell (HB) apresenta correlação representativa com a dureza Janka ($R^2= 0,87$) e os valores globais obtidos a partir dos ensaios com o durômetro portátil para madeiras o habilitam como ferramenta para a avaliação em campo da dureza de madeiras para uso como dormente ferroviário.
- O projeto do equipamento desenvolvido, que considerou carga de endentação fixa (a partir de queda livre de massa com energia mínima de 100 kgf.mm) e posterior avaliação da superfície endentada (diâmetro do endentador de 10mm), com uso de lupa graduada, apresentou-se funcional e de baixo custo, com fácil transporte e operação. As desvantagens observadas foram a precisão na leitura do diâmetro da calota endentada – diâmetros pouco variáveis nas condições extremas dos materiais analisados - agravada pelo acabamento rústico das superfícies a serem avaliadas e a diferença entre os dois diâmetros ortogonais da calota endentada, em razão da estrutura anatômica da madeira.
- Nos ensaios de repetitividade de leitura do equipamento – executados em chapa de alumínio - verificou-se o bom comportamento do equipamento, quando comparado a equipamento comercial de mensuração de dureza Brinell, operado em bancada. O melhor intervalo de confiança (95%) para o coeficiente de variação das leituras de

dureza deu-se para o ensaio de dureza E2 ($1,28\% \leq CV \leq 3,88\%$), seguido pelo ensaio de dureza E3 ($1,41\% \leq CV \leq 4,31\%$).

- Das várias energias estudadas para endentação com uso do durômetro portátil, a que revelou maior proximidade de resultados de dureza com aqueles obtidos pelo método de referência deste trabalho – dureza Janka – foi a energia de 200 kgf.mm. Para essa energia de endentação, os resultados da dureza E3 estiveram mais próximos do referencial teórico do que aqueles obtidos com a dureza E2. As duas durezas tiveram, contudo, desempenhos muito próximos.
- Os coeficientes de determinação (R^2) das regressões entre a dureza E2 e a dureza Janka e entre a dureza E3 e Janka foram de 0,79. Esses coeficientes elevados revelam a possibilidade de inferência da dureza Janka a partir dessas duas durezas, mensuradas com o durômetro portátil para madeiras.
- Concluiu-se, por fim, que o equipamento teve bom comportamento no processo de classificação de madeiras, quando se utiliza a dureza Janka como parâmetro definidor das classes. Para as classes de dureza superiores ($f_H \geq 50$ MPa e 40 MPa $\leq f_H < 50$ MPa) a classificação a partir da dureza E2 revelou percentual de acerto de 92,8% e 81,0%, respectivamente. Quando a classificação foi feita a partir da mensuração de E3, os percentuais de acerto foram 92,8% e 76,0%.

Na continuidade desta linha de pesquisa entende-se como prioritário o estudo da possibilidade de instrumentação do durômetro portátil para madeiras com acelerômetros, na tentativa de automatizar as leituras das endentações por ele promovidas, o que eliminaria grande parte de suas deficiências.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. N., Dormentes. In: *O eucalipto*. 2. ed. Jundiaí: Oficinas Tipográficas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. p. 617-36.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7511 *Dormentes de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6966 *Madeiras para dormentes*. Rio de Janeiro, 1997 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de madeira* NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS DA CENTRAL DO BRASIL, *O papel da ferrovia na política nacional de transportes*”. 1.º Encontro Nacional Ferroviário, ENFER, Brasília, 1991.

BALLARIN, A. W. Dormentes de madeira: a necessidade de uma revisão normativa. In: CONGRESSO INTERNACIONAL de MATERIAL RODANTE, Via Permanente e seus Acessórios, 1996. Anais. CB-06/ABNT, 1996.

BALLARIN, A. W.; FRANCO, N.; YOJO, T.. *Calificación de maderas brasilenãs nativas y de reforestacionas para durmientes*. In: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO, 1998, Valdivia-Chile. ACTAS Valdivia: IUFRO, 1998, (CD ROM).

BALLARIN, A.W. *Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora (E.citriodora)*. 1999, 204 p. Tese (Livre–docência em Propriedades Mecânicas e Estruturas de Madeira), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

BEKTAS, I., ALMA, M. H., AS, N. *Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech (Fagus orientalis LIPSKY)*. **Forest Products Journal**, v. 51, nº. 11/12 p. 84-87, 2001.

BRINA, H.L. *Estradas de ferro I: via permanente*. 2. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos., 1979.

BRINELL, J.A. *Sätt att bestämma kroppars hardhet jämte nagra tillämpningar af detsamma*. Teknisk Tidskrift, arg. 30, 1900.

CAIXETA, R. P., et al. *Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de Eucalyptus*. Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa, n. 1 p.43-51, 2003.

CASTRO, N. R. e LAMMY, P. A, *reforma e a modernização do setor de transporte ferroviário de carga*, In: Texto para Discussão n.º 339, Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), Rio de Janeiro, 1994.

CHIAVERINI V. *Tecnologia mecânica*, São Paulo. 1977, EDUSP.

COLENCI, A. R. *Qualificação mecânica de madeiras para uso como dormente ferroviário*, 2002. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

DAL POGETTO, M. H. F. A, *Ensaio de dureza paralela e normal às fibras da madeira*, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005 (Relatório Científico).

DICKSON, R.L., et al. *Segregation of Eucalyptus dunnii logs using acoustics*. Forest Ecology and Management, n.º. 179 p. 243-251, 2003.

FONTELLES, C. B; FRÓES, M. F. V., *A Privatização da Atividade Ferroviária no Brasil*. Congresso PAN-AMERICANO de Estradas de Ferro, La Habana, Cuba, 18-22 de setembro 2000.

FEPASA – FERROVIA PAULISTA S.A. – *Especificação Técnica VP/ET/009/99*, Campinas SP.,1999,13p.

HELLMEISTER, J. C. *Pontes de eucalipto citriodora*. São Carlos: EESC, USP,1978. 85 p.

HOLMBERG, H. *Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (Pinus sylvestris L.)*. Holz als Roh- und Werkstoff, v. 58 p.91-95, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO do MEIO AMBIENTE e dos RECURSOS RENOVÁVEIS. *Amostragem e propriedades físico-mecânicas de madeira amazônicas*. Brasília: IBAMA, 1993, Coleção Meio Ambiente – Serie estudo floresta, n.º 1.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Madeiras nacionais: tabelas de resultados de ensaios físicos e mecânicos*. – (tabelas em separata 2. ed. Boletim n.31) I.P.T., São Paulo,1964.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Métodos de ensaios adotados no I.P.T. para o estudo de madeiras nacionais*. 2 ed. São Paulo, 1956.(Boletim n.31).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Fichas de características das madeiras brasileiras*. 2. ed. São Paulo: IPT, 1989. (Publicação IPT, n. 1791).

- JANKA, G. Die h rt d s holzes. **Centralblatt f r das gessamte Forstwesen**, Wien, 32(5), p. 193-202, 1906.
- LOGSDON, N. B. *Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira*. 1998 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- LUNSTRUM, S. J. *How to calculate requires horsepower for circular saws*. Forest Products Technologist. Madison:(Technical Report, n.10),1980.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, *Contrato de Concessão que entre si celebram a União, por intermédio do Ministério dos Transportes, e as Concessionárias para explora o e desenvolvimento do serviço público de transporte ferroviário de carga nas malhas da RFFSA*, Brasília, 1996.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, Dados estatísticos, Brasília 2001.
- NIEDERAUER, F. R., *Emprego da madeira de eucalipto como dormente*. In: Encontro Brasileiro em Preserva o de Madeiras, 1. Anais... IBDF/IPT/ABPM, 1982, p.203 – 32.
- NOGUEIRA, M. C. J. A.; LAHR, F. A. R., *Indica es para o emprego de dezesseis espécies de eucaliptos na constru o civil*. In: Encontro Brasileiro de Madeiras e de Estruturas de Madeira, 1992, São Carlos. Anais... São Carlos: LaMEM – EESC – USP, v.1., p. 37 – 48.
- PANAMBRA: *Controle de dureza*. São Paulo, 1975, 28 p.(apostila).
- PORTO T. G., *A mecânica da via férrea*. Revista Ferrovia, São Paulo, n. 96, 1984.
- REDE FERROVIÁRIA FEDERAL S.A. – *Justificativa para elabora o de normas para dormentes de madeira* (EVA – 15), Rio de Janeiro, 1979. 175 p.
- RIBEIRO, L. C., et al, *O clube de engenharia nos momentos decisivos da vida do Brasil*, Rio de Janeiro, 1996.
- SALES, A.; LAHR, F.A.R. *Características de resistência mecânica de espécies de eucalipto do Estado de São Paulo*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4,1992, São Carlos. Anais...São Carlos: LAMEM, EESC, USP, 1992, v.3, p91-101.
- SCHRAMM, G. Dormentes. Técnica e economia na via permanente. Darmstadt: Otto Elsner, 1977. 278 p.
- SETTI, J.B., *História do Trem*. In: CASTELLO BRANCO, J.E. e FERREIRA, R., Tratado de Estradas de Ferro: material rodante, Rio de Janeiro: Reflexus Est dio de Produ o Gráfica, 2000, cap.1.
- SIMEFRE – Sindicato Interestadual da Indústria de Materiais e Equipamentos Ferroviários e Rodoviários, *O novo desafio ferroviário brasileiro*, Série Estudos Ferroviários, São Paulo, 2000.
- SOUZA, S. O. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. Editora Edgard Blücher, Universidade de São Paulo, 1974.

Tabela de equivalência entre durezas, 2006. Disponível em: <<http://www.armco.com.br>>. Acesso em: 14 mar. 2006.

TELLES, P.C.S., *História da engenharia no Brasil: século XVI – XIX*. 2. edição, Rio de Janeiro, Clavero Editora e Clube de Engenharia, 1984, vol 1.

_____, *História da engenharia no Brasil – Século XX*. 2. edição, Rio de Janeiro, Clavero Editora e Clube de Engenharia, 1993, vol. 2.

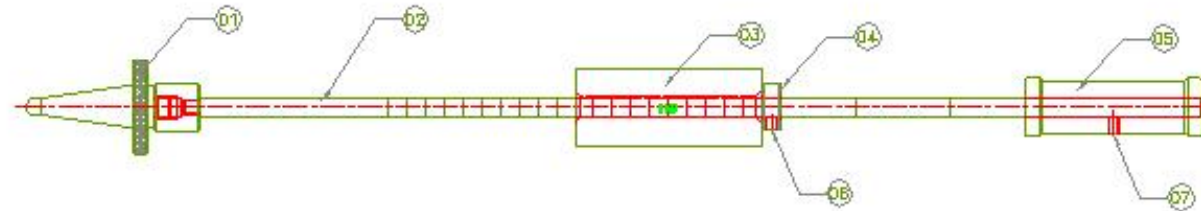
TUSET, R., TAIBO, R. G., *Producción de durmientes de eucalipto*. Montevideo: Faculdade de Agronomia, 1987. 36 p . (Boletín de Investigación, 4).

ANEXOS

ANEXO A

Projeto do durômetro portátil para madeiras

REV.	MODIFICAÇÃO	APROV. CLIENTE	DATA	DESENH.
-	-	-	-	-



07	01	PARAF. S/ CAB. TIPO ALIEN M6x1x8	-	-
08	01	PARAF. S/ CAB. TIPO ALIEN M6x1x8	-	-
05	01	FUNHO	-	CC-001-5
04	01	ANEL DE POSICIONAMENTO	-	CC-001-4
03	01	PESO 1 KG	-	CC-001-3
02	01	LAGETE	-	CC-001-2
01	01	POWERA	-	CC-001-1

ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
------	------	-----------	----------	------------

				Número des. Formador:
Des: OLMO		Data: 31/01/08	Denominação:	
Proj: ENGºCOLENO		Data: 31/01/08	CONJUNTO DURÔMETRO PORTÁTIL PESO 1KG	
Aprov: ENGºCOLENO		Data: 31/01/08	Escala:	
Projeção: 	Toler. não especificadas: Linear:	Angular:	Escala: 2:1	Formato: A3
			Dimensões: mm	Norma: CC-001

1- O ANEL POS. 04 DEVERÁ SER POSICIONADO CONFORME NECESSIDADE DE TRABALHO

NOTAS GERAIS

4

3

2

1

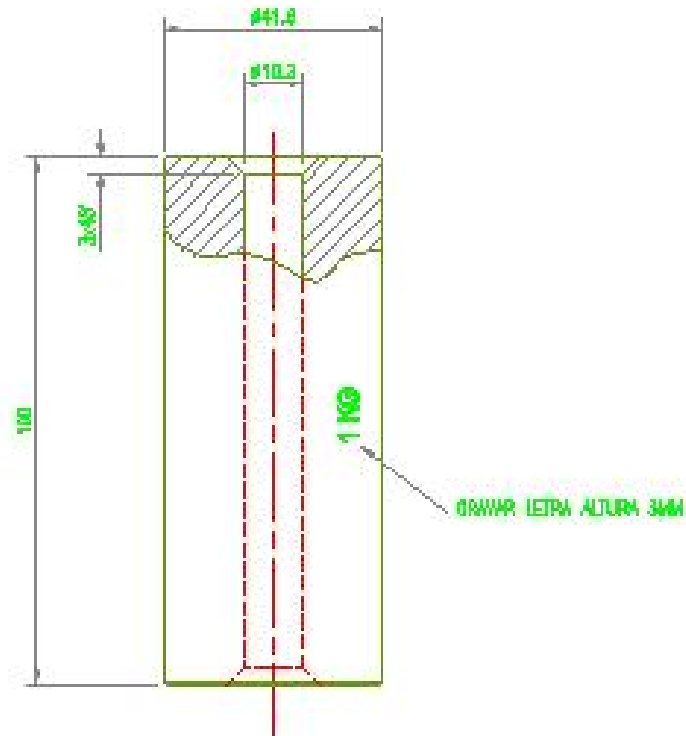
C

B

A

SANTOS 08

REV.	MODIFICAÇÃO	DATA	DESENH.
-	-	-	-



- 3 - PESO = 1 KG
- 2 - QUEBRAR CANTOS VIVOS 1x45°
- 1 - ACABAMENTO GERAL $12,5 \sqrt{}$

NOTAS GERAIS

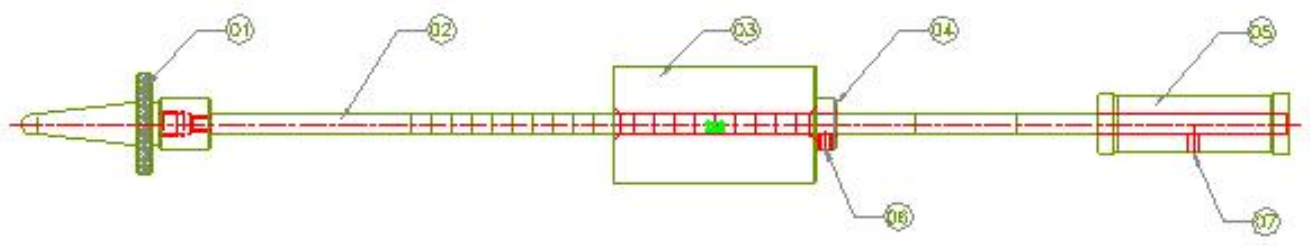
ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
-	-	BARRA REIL 41,8x100	SAE 1045	GALVANIZAR
				cliente: _____ Número das fornecedor: _____
		Data: 31/01/08 Proj: ENFOQUELNDI Aprova: ENFOQUELNDI		Denominação: PESO 1 KG DURÔMETRO PORTÁTIL
Revista:	Projeto:	Tabela: não especial	Escala:	Formato:
		Linear:	1:1	A4
		Angular:		mm
			Numero:	00-001-3

2

1

00-001-3-006

REV.	MODIFICAÇÃO	APROV. CLIENTE	DATA	DESENH.
-	-	-	-	-



ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
07	01	PARAF. S/ CAB. TIPO ALIEN M8x1,8	-	-
06	01	PARAF. S/ CAB. TIPO ALIEN M8x1,8	-	-
05	01	MANEJO	-	00-001-5
04	01	ANEL DE RODAGEM	-	00-001-4
03	01	PESO 2 KG	-	00-002-1
02	01	HASTE	-	00-001-3
01	01	PORTERA	-	00-001-1

		2010-01-01 2010-01-01 2010-01-01		c/func: _____ Numero des. Formacao: _____	
Data: OLMO Data: 31/01/08 Proj: ENGºOLENCI Data: 31/01/08 Aprov: ENGºOLENCI Data: 31/01/08		Descrição: CONJUNTO DURÔMETRO PORTÁTIL PESO 2 KG			
Revisão:	Projeto:	Toler. n.ºs. espeç.:	Escala:	Form. des.:	Dimensões:
		Linear: Angular:	2:1	A3	mm
				Normas:	00-002

1- O ANEL POS. 04 DEVERÁ SER POSICIONADO CONFORME NECESSIDADE DE TRABALHO

NOTAS GERAIS

4

3

2

1

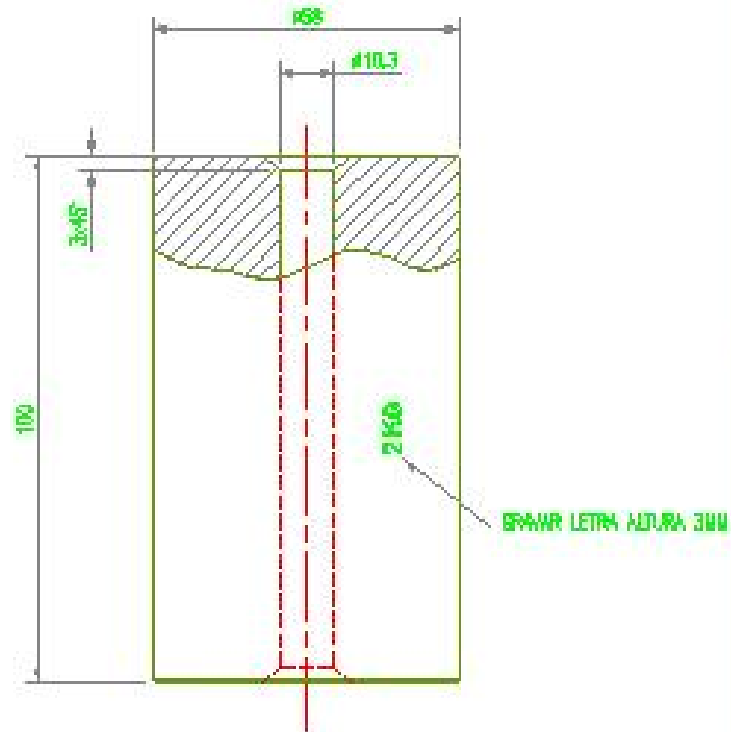
C

B

A

00-002

REV.	MODIFICAÇÃO	DATA	DESENH.
-	-	-	-



- 3 - PESO = 2KG
- 2 - QUEBRAR CANTOS VIVOS 1x45°
- 1 - ACABAMENTO GERAL $\sqrt{12.5}$

NOTAS GERAIS

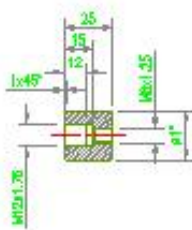
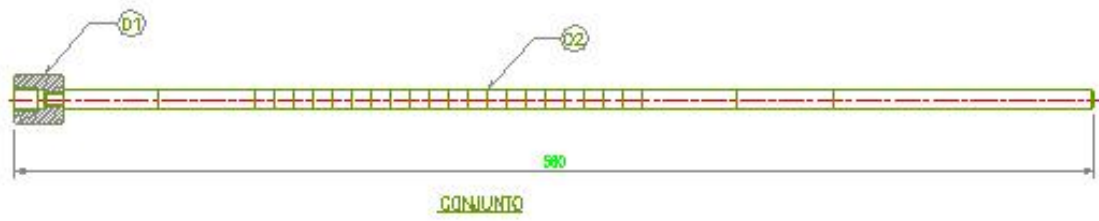
-	-	BARRA REIL 408x100	SAE 1045	CILINDRICO
ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
		cilíndrico Denominação:		
Des: OLIND Data: 31/01/08		Número das fornecedor: PESO 2 KG BURÔMETRO PORTÁTIL		
Proj: ENGºOLENG Data: 31/01/08				
Aprov: ENGºOLENG Data: 31/01/08				
Revisão:	Projeto:	Toler. não especific. Linear:	Escala:	Formato:
		Angular:	1:1	A4
				Dimensões: mm
				Num. seq: CD-002-1

2

1

C
B
A
CD-002-1.000

REV.	MODIFICAÇÃO	APROV. CLIENTE	DATA	DESENH.
-	-	-	-	-



DETALHE POS.01



DETALHE POS.02

- 3 - PROTEGER RÓSCAS ANTES DE GALVANIZAR
 - 2 - QUEBRAR CANTOS VIVOS 0.5x45
 - 1 - ACABAMENTO GERAL $\sqrt{12.5}$
- NOTAS GERAIS**

Q2	D1	BARRA RED. Ø10x544	SAE 1045	GALVANIZAR
D1	D1	BARRA RED. Ø17x25	SAE 1045	GALVANIZAR
ITEN	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
		FORÇA MOTRIZ	Número dos fornecedores	
		FORÇA MOTRIZ	Descrição:	
		FORÇA MOTRIZ	HASTE	
		FORÇA MOTRIZ	DURÔMETRO PORTÁTIL	
Des:	OLMO	Data:	31/01/09	
Proj:	ENGºCOLENO	Data:	31/01/09	
Apov:	ENGºCOLENO	Data:	31/01/09	
Revisão:	Projeto	Toler. não especificadas:	Desenho:	Formas:
		Linear:	2:1	A3
		Angular:		mm
				Norma:
				CC-001-2

4

3

2

1

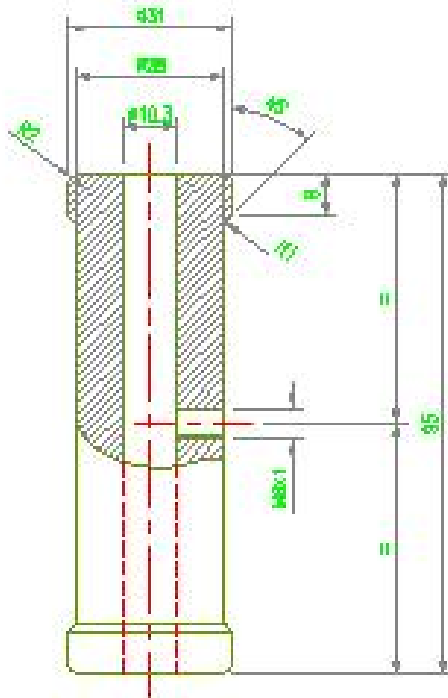
C

B

A

CC-001-2.006

REV.	MODIFICAÇÃO	DATA	DESENH.
-	-	-	-



1 - ACABAMENTO GERAL $\sqrt{12.5}$
NOTAS GERAIS

ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
-	-	BARRA REIL 431x95	ALUMINIO	
		cliente: _____ Número das. fornecedor: _____		
Des: DUVID Data: 31/01/08 Proj: ENGPOLENG Data: 31/01/08 Aprov: ENGPOLENG Data: 31/01/08		Denominação: <p style="text-align: center;">PUNHO DIAPRÔMETRO PORTÁTIL</p>		
Revêto:	Projeto:	Tela: não espeffi. Linha:	Escala: 1:1	Fornecor: 44 Classe real: mm Número: 00-001-5

2

1

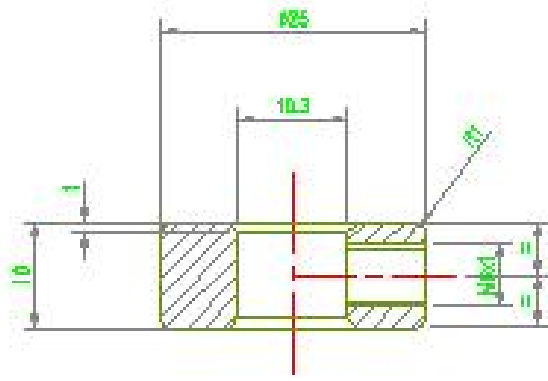
C

B

A

001-5-101-00

REV.	MODIFICAÇÃO	DATA	DESENH.
-	-	-	-



1 - ACABAMENTO GERAL $\sqrt{12.5}$
NOTAS GERAIS

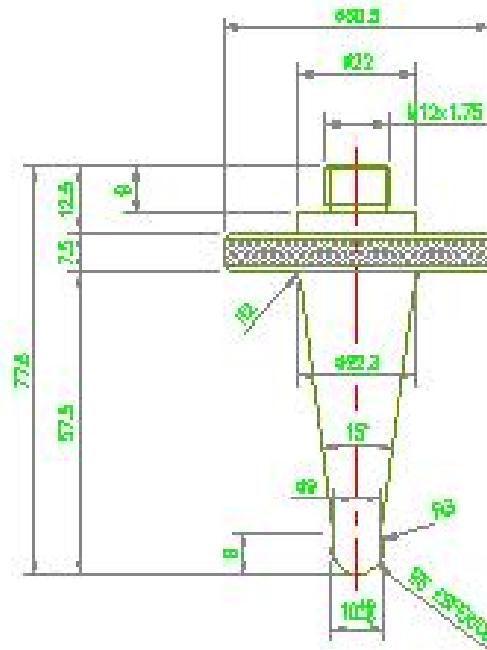
ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO		
-	-	BARRA RED. #22x10	SAE 1020	QUALIDADE		
		cliente: Denominação:	Número dos fornecedores			
Des:	OLIVE	Data: 31/01/08	ANEL DE FIXAÇÃO DIURÔMETRO PORTÁTIL			
Proj:	ENGR COLENCI	Data: 31/01/08				
Aprov:	ENGR COLENCI	Data: 31/01/08				
Revisão	Projeção	Toler. não separad.	Escala:	Formato:	Dimensões:	Numero:
		Linear: Angular:	2:1	A4	mm	CO-001-4

2

1

C
B
A

REV.	MODIFICAÇÃO	DATA	DESENH.
-	-	-	-



- 2 - QUEBRAR CANTOS VIVOS 1x45°
 1 - ACABAMENTO GERAL $R_{a} 5,3$
NOTAS GERAIS

ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
-	-	BARRA REIL 427.07.0	SAE 1045	ALUMINIZAR
				cliente: _____ Número das. fornecedor: _____
		Denominação: <p style="text-align: center;">PONTA DURÔMETRO PORTÁTIL</p>		
Des:	QUWD	Data: 31/01/08		
Proj:	ENGº COLENGI	Data: 31/01/08		
Aprov:	ENGº COLENGI	Data: 31/01/08		
Rev. 01:	Proj. 01:	Toler. não especificadas	Escala:	Formas:
		Linear:	1:1	A4
		Angular:		mm
				Quantidade: 1

2

1

C

B

A

001-001-1.006

ANEXO B

Resultados gerais dos ensaios realizados

ANEXO C

Tabela de equivalência entre durezas ARMCO do Brasil S.A.



O produto que você usa tem nosso aço.
Our steel goes into your product.

ISO/TS 16949:2002 | ISO 9001:2000 | ISO 14001 | Empresa Amiga da Criança

Armco do Brasil S.A.

site: www.armco.com.br

**TABELA DE EQUIVALÊNCIA ENTRE DUREZAS
ASTM E 140
Rockweel B Hardness Range**

Rockwell C Hardness Number 100 kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^c	Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number 100 kgf (HRB)
						15-T Scale, 15-kgf (HR 15-T)	30-T, Scale 30-kgf (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf (HR 45-T)	
100	240	240	251	61.5	-	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	-	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	-	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	-	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	-	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	-	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	-	91.2	79.1	66.9	94
93	200	200	216	57.0	-	90.8	78.4	65.9	93
92	195	195	211	56.4	-	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	-	90.2	77.1	63.8	91
90	185	185	201	55.2	-	89.9	76.4	62.8	90
89	180	180	196	54.6	-	89.5	75.8	61.8	89
88	176	176	192	54.0	-	89.2	75.1	60.8	88
87	172	172	188	53.4	-	88.9	74.4	59.8	87
86	169	169	184	52.8	-	88.6	73.8	58.8	86
85	165	165	180	52.3	-	88.2	73.1	57.8	85
84	162	162	176	51.7	-	87.9	72.4	56.8	84
83	159	159	173	51.1	-	87.6	71.8	55.8	83
82	156	156	170	50.6	-	87.3	71.1	54.8	82
81	153	153	167	50.0	-	86.9	70.4	53.8	81
80	150	150	164	49.5	-	86.6	69.7	52.8	80
79	147	147	161	48.9	-	86.3	69.1	51.8	79
78	144	144	158	48.4	-	86.0	68.4	50.8	78
77	141	141	155	47.9	-	85.6	67.7	49.8	77
76	139	139	152	47.3	-	85.3	67.1	48.8	76



O produto que você usa tem nosso aço.
Our steel goes into your product.

ISO/TS 16949:2002 | ISO 9001:2000 | ISO 14001 | Empresa Amiga da Criança

Armco do Brasil S.A.

site: www.armco.com.br

Rockwell C Hardness Number 100 kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^c	Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number 100 kgf (HRB)
						15-T Scale, 15-kgf (HR 15-T)	30-T, Scale 30-kgf (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf (HR 45-T)	
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	75
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	74
73	132	132	145	45.8	98.5	84,3	65.1	45.8	73
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	72
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	71
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	70
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	69
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	68
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	67
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	66
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	65
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	64
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	63
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	62
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	61
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	60



O produto que você usa tem nosso aço.
Our steel goes into your product.

ISO/TS 16949:2002 | ISO 9001:2000 | ISO 14001 | Empresa Amiga da Criança

Armco do Brasil S.A.

site: www.armco.com.br

Rockwell C Hardness Number 100 kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number, 3000-kgf, 10-mm Ball	Knoop Hardness, Number 500-gf and Over	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf Diamond Penetrator	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball
						15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	59
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	58
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	57
56	101	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	56
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	55
54	-	-	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	54
53	-	-	110	36.3	87.1	77.9	51.7	25.7	53
52	-	-	109	35.9	86.5	77.5	51.0	24.7	52
51	-	-	108	35.5	86.0	77.2	50.3	23.7	51
50	-	-	107	35.0	85.4	76.9	49.7	22.7	50
49	-	-	106	34.6	84.8	76.6	49.0	21.7	49
48	-	-	105	34.1	84.3	76.2	48.3	20.7	48
47	-	-	104	33.7	83.7	75.9	47.7	19.7	47
46	-	-	103	33.3	83.1	75.6	47.0	18.7	46
45	-	-	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	45
44	-	-	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	44
43	-	-	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	43
42	-	-	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	42
41	-	-	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	41
40	-	-	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	40
39	-	-	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	39
38	-	-	95	29.9	78.6	73.0	41.6	10.6	38
37	-	-	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	37
36	-	-	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	36
35	-	-	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	35
34	-	-	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	34
33	-	-	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	33
32	-	-	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	32
31	-	-	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	31
30	-	-	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	30