

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM DURÔMETRO PORTÁTIL PARA  
MADEIRAS COM O USO DE TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO**

**ALBERT AUGUSTO DE ASSIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Maio de 2015

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM DURÔMETRO PORTÁTIL PARA  
MADEIRAS COM O USO DE TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO**

**ALBERT AUGUSTO DE ASSIS**

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,  
para obtenção do título de Mestre em Agronomia  
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Maio de 2015

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

Assis, Albert Augusto de, 1980-  
A848d      Desenvolvimento de um durômetro portátil para madeiras com o uso de transdutor de deslocamento / Albert Augusto de Assis. - Botucatu : [s.n.], 2015  
            ix, 76 f. : fots. color., grafs., ils. color., tabs.

            Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015  
            Orientador: Adriano Wagner Ballarin  
            Inclui bibliografia

            1. Madeira - Densidade. 2. Dureza. 3. Matéria - Propriedades. 4. Madeira - Testes. I. Ballarin, Adriano Wagner.  
            II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

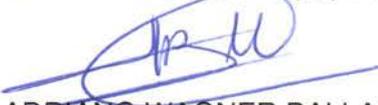
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** DESENVOLVIMENTO DE UM DURÔMETRO PORTÁTIL PARA MADEIRAS COM O USO DE TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO

**AUTOR:** ALBERT AUGUSTO DE ASSIS

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA) , pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN  
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu



Prof. Dr. CARLITO CALIL JUNIOR  
Depto de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos-Usp



Prof. Dr. ROBERTO ANTONIO COLENCI  
/ Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Data da realização: 25 de junho de 2015.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Linda e aos meus filhos Bruno e Lívia.

*“E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração,  
como ao Senhor, e não aos homens”.*

Colossenses 3:23

## AGRADECIMENTOS

*A Jesus, meu salvador, pois tem tornado a minha jornada vitoriosa e a minha existência possível, apesar de mim.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin pela oportunidade, paciência, dedicação e exemplo profissional e pessoal que sempre foi para mim.*

*À minha amada esposa Linda, duas vezes linda, e aos meus filhos Bruno e Lívia pelo amor, companheirismo, carinho e pelo incentivo que me deram para a conclusão deste trabalho.*

*Aos meus pais Luíz e Rita, por sempre “darem o seu tudo” por todos os filhos.*

*Aos meus irmãos Ana, Heberte e às suas famílias, por me alegrarem sempre com sua amizade e afeto.*

*Ao Dr. Roberto Antonio Colenci pelo pioneirismo no desenvolvimento da primeira versão do durômetro portátil, imprescindível para realização deste trabalho.*

*Aos companheiros de pesquisa Rogério Pinto Alexandre e Ailton de Lima Lucas, por suas contribuições e amizades preciosas.*

*Aos profissionais que trabalharam voluntariamente neste trabalho, pela disposição, perícia e virtuosidade técnica que doaram generosamente: Marco Antônio (ferramenteiro), pela construção mecânica do durômetro, Luciano Marcolino (projetista), pelo desenho técnico e Fabio de Lima (engenheiro eletrônico), pelo desenho da placa eletrônica.*

*À empresa Eucatex S/A por possibilitar e facilitar a realização da pesquisa.*

*À empresa Prema Tecnologia e Comércio S/A, pelo fornecimento das madeiras utilizadas neste trabalho.*

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
RESUMO .....	1
SUMMARY .....	2
1. INTRODUÇÃO .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Transdutor de deslocamento linear.....	5
2.1.1 Encoder .....	5
2.1.2 Encoder Magnético Linear .....	6
2.1.3 Interpretação dos sinais de um encoder .....	7
2.1.4 Medição de velocidade e aceleração por meio de encoders .....	8
2.2 Micro-controlador, processador e controlador digital de sinais.....	9
2.3 A dureza da madeira .....	10
2.3.1 Histórico e considerações gerais.....	10
2.3.2 Métodos para avaliação de dureza na madeira .....	12
2.3.3 Dureza dinâmica na madeira .....	17
2.3.4 Fatores que influenciam a dureza da madeira .....	21
2.4 Limitações mecânicas das primeiras versões do durômetro portátil para madeiras .....	23
2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica.....	24
3. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	26
3.1 Características mecânicas do durômetro portátil para madeiras – DPM3.....	26
3.2 Automação eletrônica do durômetro Portátil para madeiras – DPM3 .....	29
3.3 Características funcionais do Durômetro Portátil para Madeiras – DPM3 .....	31
3.4 Material e métodos do programa experimental.....	33
4. RESULTADOS .....	36
4.1 Tipologia geral do fenômeno observado com o sensor de deslocamento .....	36
4.2 Ensaios de calibração.....	38
4.3 Ensaios de validação.....	47
4.4 Dispersão dos valores de dureza na madeira .....	49
4.5 Importância do uso da dureza média para os ensaios por endentação .....	53
4.6 Validação do modelo para estimativa de tempo de endentação.....	55

5. CONCLUSÕES .....	57
6. REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE 1 .....	64
APÊNDICE 2 .....	73

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Condições de ensaio utilizadas por Colenci (2006).....	19
Tabela 2 – Espécies utilizadas no lote de calibração do DPM3 .....	34
Tabela 3 – Espécies utilizadas no lote de validação do DPM3 .....	34
Tabela 4 – Estatística descritiva da dureza Janka e da dureza HD.....	38
Tabela 5 – Referências alternativas para força utilizadas em pesquisas anteriores.....	39
Tabela 6 - Comparação de resultados de diferentes metodologias para cálculo de dureza.	41
Tabela 7 – Estatística descritiva das medições de endentação do DPM3 .....	42
Tabela 8 – Estatística descritiva das medições de tempo de endentação do DPM3 .....	43
Tabela 9 – Estatística descritiva da Dureza HD, Janka e Janka estimada.....	48
Tabela 10 – Coeficiente de variação de dureza Janka das vigas (ensaios de validação) .....	50
Tabela 11 – Resultados das associações das médias das durezas HD e Janka por viga .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Encoder ótico incremental: a) disco perfurado, b) foto-transistor, c) feixe de luz e d) foto-diodo .....	6
Figura 2 - Encoder magnético: a) sensor, b) representação do campo magnético e c) fita magnética.....	6
Figura 3 - Representação de fase dos canais de um encoder incremental .....	7
Figura 4 - Relação de incrementos por mudança de estado lógico dos canais do encoder....	8
Figura 5 - Ilustração do ensaio de dureza Brinell .....	13
Figura 6 - Seção transversal do perfil de endentação exibindo o raio da esfera (R), a profundidade de contato ( $h_c$ ), a profundidade de <i>pile-up</i> e <i>sinking-in</i> (s) e a profundidade de endentação (h).....	15
Figura 7 - Método para medição de dureza dinâmica em painéis de baixa densidade .....	18
Figura 8 – Durômetro Portátil para Madeiras: a) primeira geração, b) segunda geração ....	20
Figura 9 - Protótipo de equipamento para medição de dureza dinâmica. 1) massa de impacto, 2) guias e 3) esfera metálica.....	21
Figura 10 - Desenho esquemático funcional da primeira (a) e terceira (b) geração do durômetro portátil para madeiras. Endentador (verde), Guia (Azul), Massa de impacto (cinza), transdutor de deslocamento (vermelho), material em avaliação (textura de madeira).....	27
Figura 11 – Durômetro Portátil para Madeiras: a) equipamento na posição vertical, b) detalhe do painel eletrônico, c1) flange, c2) endentador, c3) manípulo e c4) suporte principal.....	28
Figura 12 - Esquema geral das conexões do circuito eletrônico. ....	30
Figura 13 - Esquema geral com as posições para realização dos ensaios de dureza .....	35
Figura 14 – Sinal completo do ensaio, desde o impacto inicial até o amortecimento completo dos movimentos dos corpos envolvidos. ....	36
Figura 15 – Sinal de deslocamento registrado no primeiro impacto do ensaio de dureza dinâmica HD.....	37
Figura 16 - Dureza Janka versus dureza HD medida pelo Durômetro Portátil DPM3 .....	39
Figura 17 - Dureza Janka versus dureza HD* medida pelo Durômetro Portátil DPM3 .....	40
Figura 18 – Comparação entre os modelos ajustados para das durezas HD e HD* .....	40
Figura 19 - Dureza Janka* (endentação de 2,82 mm) versus dureza dinâmica HD .....	42

Figura 20 - Diagrama de deslocamento no domínio do tempo para três ensaios distintos ..	43
Figura 21 – Correlação entre tempo e profundidade de endentação.....	44
Figura 22 - Relação teórica entre dureza HD e profundidade de endentação. ....	45
Figura 23 – Resultado do ensaio Janka em 10 corpos-de-prova da espécie <i>E. microcorys</i> .	46
Figura 24 – Associação da dureza Janka medida em laboratório e a dureza Janka estimada a partir da dureza HD .....	48
Figura 25 – Associação da dureza Janka [n] com a dureza Janka [n+1] .....	51
Figura 26 – Associação da dureza Janka com seu valor estimado a partir da dureza HD ...	52
Figura 27 – Associação da dureza Janka com seu valor estimado a partir da dureza HD ...	53
Figura 28 – Coeficientes de determinação para associações entre dureza Janka com média de 10 pontos e dureza Janka média com números distintos de pontos. ....	54
Figura 29 – Correlação entre o tempo de endentação medido pelo DPM3 e o tempo de endentação estimado pelo modelo $y = 0,844x - 0,041$ .....	55

## RESUMO

A dureza é considerada um importante indicador de qualidade da madeira, pois, além de ser um teste de fácil aplicação, também apresenta boa correlação com outras propriedades importantes do material, como a densidade, compressão paralela e normal às fibras. O ensaio de dureza Janka tem sido amplamente utilizado na América do Sul e do Norte, enquanto que o ensaio de dureza Brinell tem tido predominância na Europa. Mais recentemente, estudos internacionais têm relatado a utilização da dureza dinâmica para a madeira, apresentando como principal vantagem a viabilização de ensaios em condições de campo. Este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento da terceira geração de um durômetro portátil para madeiras, que utiliza transdutor de deslocamento e processador eletrônico embarcado a fim de automatizar as medições de dureza dinâmica. Os ensaios funcionais do equipamento, realizados em oito espécies de eucalipto, revelaram forte correlação com a dureza Janka a possibilidade de sua estimativa por meio da dureza dinâmica. Além disso, os problemas clássicos de recuperação da área endentada e “*sinking-in*” foram contornados, pois o equipamento mediu a profundidade de endentação sob carga. Adicionalmente este trabalho propõe uma nova metodologia para cálculo da dureza dinâmica baseada na razão entre a força média resultante do impulso e a profundidade da endentação.

---

Palavras chave: dureza dinâmica, durômetro portátil, dureza Janka, dureza Brinell

DEVELOPMENT OF A PORTABLE HARDNESS TESTER FOR WOOD USING DISPLACEMENT TRANSDUCER. Botucatu, 2015. 76p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ALBERT AUGUSTO DE ASSIS

Adviser: ADRIANO WAGNER BALLARIN

## SUMMARY

Hardness is considered a meaningful quality indicator for wood and correlates well with other mechanical properties of the material, like compressive strengths normal and perpendicular to the grain. Besides its good correlation to those mechanical properties, the hardness test is easier to perform than any other strength test. In Europe the most widely used method for determining wood hardness is the Brinell test, whereas in the Americas the Janka test is predominant. More recently, international studies have reported the use of dynamic hardness for wood, claiming as main advantage the feasibility of tests under field conditions. This paper presents results obtained in the development of the third generation of a portable hardness tester for wood, which uses displacement transducer and embedded electronic processor in order to automate the dynamic hardness measurement. Functional tests of the equipment carried out using eight species of Eucalyptus, revealed strong correlation to Janka hardness and the possibility of its prediction by dynamic hardness. Beyond that, the classical problems of “sinking-in” and recovery of the indented area were solved by the equipment using under-load measurements of indentation’s depth. Furthermore, this paper introduces a new methodology for dynamic hardness calculation, which is based on the ratio between the average impulse force promoted by the indentation and its depth.

---

Keywords: dynamic hardness, portable hardness tester, Janka hardness, Brinell hardness

## 1. INTRODUÇÃO

Durômetro é um equipamento destinado a medir a dureza dos materiais, que expressa a resistência que um material oferece à endentação (ou penetração) de um corpo. Existem diversos tipos de durômetros e metodologias distintas para avaliação da dureza de uma ampla gama de materiais. Para a madeira, os ensaios Janka e Brinell têm sido tradicionalmente utilizados, o primeiro com predominância na América do Norte e América do Sul, e o segundo na Europa.

Pesquisas recentes têm enfatizado a demanda do mercado por durômetros portáteis para madeira. O setor ferroviário, por exemplo, não tem práticas eficientes e consolidadas para a classificação de dormentes em condições de campo (COLENCI, 2006), de igual modo, o setor de pisos de madeira também carece de equipamentos que forneçam, além de precisão e praticidade, a possibilidade de medições além dos ambientes de laboratório. As empresas compram um grande volume de madeira e precisam avaliar corretamente a sua qualidade em campo.

Os ensaios tradicionais de medição de dureza da madeira, Janka e Brinell, são considerados estáticos, pois utilizam taxas de carregamento muito baixas. Estas metodologias não favorecem o desenvolvimento de durômetros portáteis devido principalmente a dificuldade de se controlar o carregamento com equipamentos de tamanho reduzido. Além desta dificuldade, o ensaio de dureza Janka em específico, envolve forças de alta magnitude para sua realização; já a dureza Brinell, que pode ser empreendida com a utilização de forças moderadas, demanda precisão na avaliação das

dimensões da endentação promovida no material, o que não pode ser facilmente alcançado em condições de campo devido às características peculiares da madeira.

Alguns pesquisadores têm proposto a utilização da dureza dinâmica na madeira justificando, especialmente, a viabilização de ensaios em condições de campo. Duas gerações de um equipamento portátil com este objetivo – durômetro portátil para madeiras - já foram desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisa em Produtos Florestais da FCA / UNESP - Botucatu, para avaliação da dureza dinâmica da madeira. A primeira geração - um equipamento não instrumentado - apresentou bons resultados, porém algumas limitações foram detectadas, impostas principalmente pela dificuldade de leitura da superfície endentada, com uso de uma lupa graduada (COLENCI, 2006). A segunda geração do equipamento teve como objetivo automatizar a leitura da dureza por meio de instrumentação com acelerômetros (BALLARIN et al., 2012). Os resultados desta segunda geração foram comprometidos por ruídos presentes nos sinais, porém revelaram que a técnica utilizada foi promissora.

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento da terceira geração do durômetro portátil com o uso de transdutor de deslocamento. Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Adaptar o arranjo mecânico atual do durômetro para comportar o acoplamento do transdutor de deslocamento linear.
- Desenvolver uma placa eletrônica portátil integrada ao arranjo mecânico do durômetro, que permita a operação do equipamento sem a necessidade de alimentação de energia externa, ou seja, o equipamento deve funcionar com baterias.
- Desenvolver uma automação eletrônica com processamento autônomo, capaz de receber e tratar os sinais do transdutor de deslocamento sem a necessidade de programas computacionais adicionais e nem outros sistemas de aquisição de dados. A dureza deve ser calculada e exibida em um *display* de cristal líquido (LCD), instantaneamente após a realização do ensaio.
- Proporcionar ao circuito eletrônico a possibilidade de exportar os dados de ensaios via comunicação serial para outros dispositivos ou sistemas.
- Disponibilizar os dados de ensaio para estudos futuros sobre o fenômeno de endentação na madeira.
- Determinar a relação entre a dureza avaliada pelo durômetro instrumentado e a dureza Janka.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Transdutor de deslocamento linear**

#### **2.1.1 Encoder**

Em automação industrial o termo encoder refere-se a um transdutor de deslocamento linear ou angular, amplamente utilizado nos sistemas de controle de movimento (MERRY et al., 2010) devido sua fácil aplicação em circuitos digitais como detectores de velocidade ou deslocamento (MIYASHITA et al., 1987). O uso mais comum dos encoders na indústria ocorre na medição da posição angular de eixos de motores elétricos com objetivo de retro-alimentação de malhas de controle de velocidade ou posição. O encoder ótico rotativo incremental, tipo de encoder mais empregado nestas malhas de controle (YEH et. al., 1998), é composto basicamente por um conjunto de fotodiodos e foto-transistores separados por um disco perfurado (MIYASHITA et al., 1987), conforme apresentado na Figura 1. O movimento do disco perfurado produzirá sucessivas interrupções no feixe de luz e, conseqüentemente, sucessivos chaveamentos do foto-transistor produzindo, desta forma, pulsos digitais proporcionais ao movimento do disco (RANIEL, 2011). A diferença entre um encoder ótico rotativo e um linear está no dispositivo mecânico utilizado para seccionar o feixe de luz: no primeiro caso é um disco e, no segundo, uma fita perfurada.

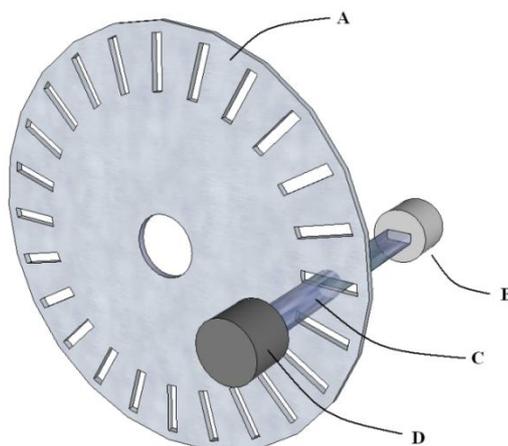


Figura 1 - Encoder óptico incremental: a) disco perfurado, b) foto-transistor, c) feixe de luz e d) foto-diodo

### 2.1.2 Encoder Magnético Linear

Um encoder magnético linear é composto por uma fita e um sensor magnético. A fita magnética possui pólos magnéticos alternados, dispostos de forma equidistante ao longo de seu comprimento, produzindo deste modo um campo magnético alternado com período definido pela distância dos pólos. O sensor possui um elemento magneto-resistivo cuja resistividade se altera de acordo com a intensidade do campo magnético em que se encontra (MIYASHITA et al., 1987). Quando o sensor se move ao longo do campo magnético alternado da fita, o seu circuito eletrônico interpreta estas alternâncias e produz pulsos elétricos digitais proporcionais ao movimento, assim como os encoders óticos. A Figura 2 apresenta a disposição destes componentes bem como a representação do campo magnético produzido pela fita.

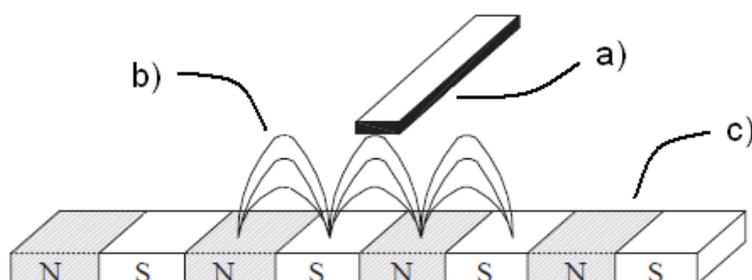


Figura 2 - Encoder magnético: a) sensor, b) representação do campo magnético e c) fita magnética.

Fonte: Adaptado de Shi et.al. (2004).

Existem diversas tecnologias diferentes de encoder disponíveis para uma ampla gama de aplicações (YU; ZHANG, 2010), porém todas funcionam com o princípio de geração de pulsos proporcionais ao deslocamento, seja este linear ou angular. O valor de deslocamento, registrado pelo circuito que recebe os sinais do encoder, é incrementado ou decrementado de acordo com os pulsos produzidos pelo encoder, por este motivo estes últimos são chamados encoders incrementais.

### 2.1.3 Interpretação dos sinais de um encoder

O sinal de saída de um encoder incremental consiste de dois pulsos distintos A e B defasados em  $90^\circ$  (NEGREA, 2013), cuja interpretação possibilita a identificação do sentido do movimento pelo circuito de aquisição de dados (Figura 3).

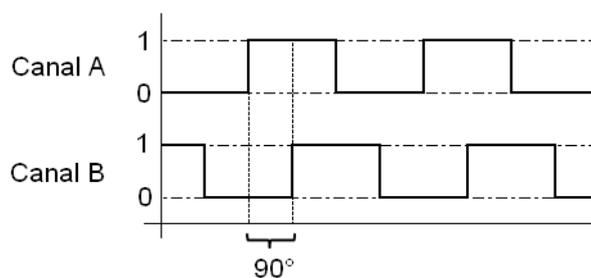


Figura 3 - Representação de fase dos canais de um encoder incremental

A resolução de um encoder rotativo é medida pelo número de pulsos que o componente fornece em uma volta completa de seu eixo. A unidade de medida de resolução é “PPR”, sigla que corresponde a abreviação de “pulsos por revolução” (RANIEL, 2011). Para determinar a resolução angular do componente basta dividir a resolução dada em PPR por  $360^\circ$  (OLIVEIRA, 2007). No encoder linear, a resolução está relacionada a distancia entre cada pulso do componente, e corresponde à menor variação da grandeza medida que pode ser percebida pelo sensor. A unidade de resolução normalmente utilizada neste tipo de equipamento é um submúltiplo de metro (mm ou  $\mu\text{m}$ ).

O circuito de interpretação do sinal do encoder pode trabalhar em três modos distintos: x1, x2 e x4, sendo que cada um representa o número vezes que a resolução pode ser aumentada (MICROCHIP, 2008). No modo x1 o incremento do

deslocamento medido será realizado quando o período completo de um canal for concluído; já no modo x2, as bordas de subida e descida de um canal serão consideradas para incremento do deslocamento medido; por sua vez o modo x4 considera as bordas de subida e descida dos dois canais para incremento do deslocamento medido.

Um encoder rotativo com 1024 pulsos por revolução (PPR=1024), sendo lido em modo x4, produzirá 4096 incrementos por volta, desta forma a resolução angular do componente foi aumentada em quatro vezes. A Figura 4 apresenta a relação de incrementos por mudança de estado lógico dos canais de um encoder sendo interpretado em modo x4. A resolução de um encoder linear é especificada para um circuito de leitura configurado em modo x1, já o valor obtido por multiplicação (modo x4) é denominado resolução máxima.

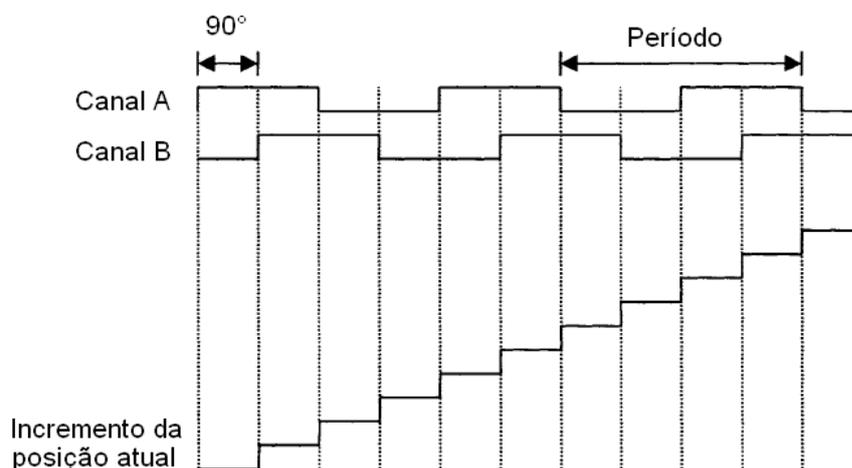


Figura 4 - Relação de incrementos por mudança de estado lógico dos canais do encoder.

Fonte: Adaptado de Ellis (2012).

#### 2.1.4 Medição de velocidade e aceleração por meio de encoders

Diversos autores propõem variados métodos para medição de velocidade e aceleração por meio de encoders incrementais.

Kadhim et al. (1992) informam que a medição de velocidade e aceleração com encoders por meio da derivação direta da posição está sujeita a erros de quantização. Estes erros de quantização limitam a performance de sistemas de controle que exigem alta precisão (MERRY et al., 2010).

Os dois métodos de medição de velocidade e aceleração mais utilizados e amplamente discutidos na literatura, consistem na avaliação do período ou da frequência dos pulsos do encoder. O primeiro método, baseado na avaliação do período, utiliza um gerador de pulsos de frequência muito superior a frequência do encoder para aplicação da técnica; já o segundo, baseado na frequência, realiza a contagem dos pulsos do encoder em um determinado período de tempo (NEGREA, 2013). O método baseado na avaliação do período é mais preciso para medição de velocidades de baixa magnitude, já o segundo método é mais indicado para medição de altas velocidades. Negrea (2013) combinou os dois métodos para fins de controle dinâmico de motores elétricos.

Merry et al. (2010) utilizaram inicialmente técnica baseada em ajuste de polinômios para estimativa de velocidade e aceleração de encoders de baixa resolução. Em trabalho mais recente, os autores citaram diversas literaturas que propõem técnicas variadas para medição de velocidade e aceleração a partir de encoders incrementais (MERRY et al. 2013).

## **2.2 Micro-controlador, processador e controlador digital de sinais**

O micro-controlador, comumente referido como MCU (*Micro-Controller Unit*), é um circuito integrado programável e de baixo custo que possui unidade central de processamento (CPU), memória e periféricos de entrada e saída. Ao contrário dos micro-processadores, que precisam de circuitos e componentes auxiliares para funcionar, o micro-controlador incorpora todos os recursos necessários para operar em um único chip sendo, por esta razão, também chamado de “micro-computador *single-chip*” (HAO et al., 2010).

O micro-controlador é amplamente empregado em instrumentação, sensores e dispositivos inteligentes, aquisição e processamento de dados, robótica e circuitos eletrônicos em geral (LIU; WANG, 2012; HAO et al., 2010).

O processador digital de sinal (DSP) é outra classe de circuito integrado, desenvolvido com o objetivo inicial de tratamento de sinais em tempo real. Este dispositivo é muito utilizado em instrumentos musicais eletrônicos e telecomunicações e possui processadores matemáticos de sinais com desempenho muito superior aos processadores dos MCUs. Porém, ao contrário destes, precisa de circuitos auxiliares para funcionar (MITRA, 2005).

Em 2002, com a evidente convergência dos mercados de MCUs e DSPs (MITRA, 2005), a empresa *Microchip* desenvolveu o controlador digital de sinais (DSC). Esse componente agregou o poder de processamento matemático dos DSPs com a arquitetura *single-chip* e comportamento determinístico dos MCUs, resultando num componente de altíssima performance e flexibilidade (HUDDLESTON, 2006).

## **2.3 A dureza da madeira**

### **2.3.1 Histórico e considerações gerais**

A qualidade da madeira pode ser caracterizada por diversas propriedades, dependendo da importância delas no uso final do produto (HERÄJÄRVI, 2004). Para pisos de madeira, por exemplo, a dureza é considerada a propriedade mais importante (MEYER et al., 2011; NIEMZ; STÜBI, 2000) influenciando a resistência do material contra riscos, desgaste e abrasão (GREKIN; VERKASALO, 2013; TODARO, 2012).

A dureza também é considerada um dos indicadores mais importantes de qualidade da madeira (HIRATA et al., 2001), pois apresenta boa correlação com outras propriedades mecânicas importantes do material como, por exemplo, a compressão paralela e normal às fibras (IBAMA, 1993; COLENCI, 2002).

Segundo Holmberg (2000), a dureza superficial dos materiais já tem sido descrita e quantificada há muito tempo por diversos autores como Brinell em 1900, Janka em 1906 e Mörat em 1932.

Doyle (1980) apresentou uma análise exploratória dos testes de dureza na madeira, desde o início do século 19 até o surgimento de diversos métodos e normas em diversos países.

Walley (2012) cita que os métodos de avaliação da dureza de materiais começaram a se desenvolver no século 19 e algumas máquinas para avaliação de dureza foram disponibilizadas comercialmente no início do século 20. Segundo o autor, Wade, em 1856 e Calvert e Johnson, em 1859, reportaram as primeiras máquinas de avaliação de dureza por endentação.

Basicamente, a dureza consiste na resistência do material à endentação (ou penetração) de um corpo. A capacidade de resistir aos esforços de

deformação impostas está relacionada principalmente à densidade do material (SOARES-FERREIRA, 2011).

Em um teste típico por endentação, uma ferramenta de dureza elevada e com geometria conhecida é pressionada contra o material em avaliação e a dureza é obtida pela razão entre a força aplicada e a endentação promovida no material (DOYLE; WALKER, 1985). O resultado deste teste é um valor quantitativo de dureza. (DUBOVSKÝ; ROHANOVÁ, 2007).

A dureza da madeira normalmente é abordada mais como uma propriedade prática e operacional do que como uma propriedade mecânica individual (HERÄJÄRVI, 2004). Isto se deve ao fato de forças diversas e distintas afetarem o resultado da dureza como, por exemplo, fricção, cisalhamento e compressão (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Além disso, a dureza é de fato, mais do que outras propriedades, dependente das condições do ensaio e da metodologia utilizada (KÚDELA, 1998).

Dubovský e Rohanová (2007) concordam com esta idéia ao comentar que em uma mesma amostra arbitrária de madeira é possível encontrar distintos valores de dureza, da mesma maneira que se podem empregar diversas metodologias para avaliação da propriedade. Portanto, tecnicamente, a dureza não pode ser perfeitamente definida como uma grandeza mecânica, tendo em vista que o seu valor é muito dependente de propriedades complexas do material testado e de condições experimentais do próprio ensaio.

Kollmann e Côté (1968), baseados na complexidade envolvida na avaliação da dureza na madeira, sugeriram que os ensaios de dureza, como concebidos em sua época, deveriam ser totalmente eliminados, devido sua ineficácia e conseqüente invalidade.

Apesar disso, a facilidade de aplicação de um ensaio de dureza por endentação, e a sua comprovada boa correlação com outras importantes propriedades mecânicas da madeira, asseguram e justificam a ampla utilização destes ensaios em todo o mundo. Lavers (1968), conforme citado por Doyle (1980), comenta que devido à excelente correlação entre a dureza Janka e a compressão normal às fibras, o Laboratório de *Princes Risborough (Building Research Establishment, Reino Unido)* sugeriu que o último teste não precisaria mais ser realizado, e o valor da resistência à compressão normal poderia ser calculado a partir da dureza Janka.

### 2.3.2 Métodos para avaliação de dureza na madeira

Os métodos de avaliação da dureza podem ser classificados em dois grupos: o primeiro é caracterizado por medir a força necessária para a penetração de uma peça e o segundo é caracterizado por medir a deformação causada por um instrumento com dimensão e carga de penetração pré-estabelecidos (HOLMBERG, 2000; BALLARIN et al., 2010).

O primeiro ensaio de dureza por endentação, padronizado e reconhecido industrialmente, foi o ensaio Brinell, proposto pelo metalurgista sueco Johan August Brinell, por volta do ano de 1900 (BARBOSA, 2010).

O ensaio de dureza Brinell, como ilustrado na Figura 5, consiste em pressionar com a força  $F$ , uma esfera de aço de diâmetro  $D$ , sobre a superfície do material em avaliação produzindo, desta forma, uma impressão no formato de uma calota esférica de diâmetro  $d$ . O valor da dureza será obtido pela relação entre a força aplicada e a área da calota esférica produzida no material (SONMEZ; DEMIR, 2007), de acordo com a expressão:

$$HB = \frac{F}{\pi Dh} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Onde:  $HB$  - dureza Brinell (HB)

$F$  - força aplicada (kgf)

$D$  - diâmetro da esfera de aço (mm)

$d$  - diâmetro da endentação residual promovida no material (mm)

$h$  - profundidade da endentação (mm)

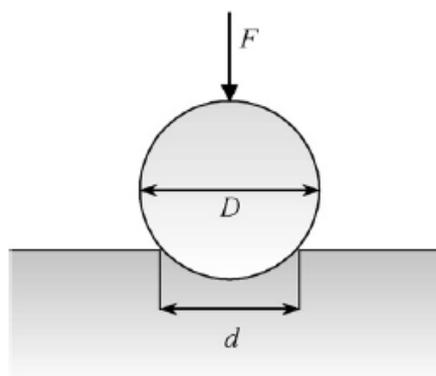


Figura 5 - Ilustração do ensaio de dureza Brinell  
 Fonte: Sonmez e Demir (2007)

Por não ser um conceito físico satisfatório, a unidade  $kgf/mm^2$ , que deveria ser sempre colocada após o valor da dureza Brinell, é omitida, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da endentação promovida. Com base neste princípio, a norma americana ASTM 370 (1977) indica a utilização da sigla *HB* como unidade de dureza Brinell.

Grekin e Verkasalo (2013), baseados na norma europeia EN1534 (2000), utilizaram a unidade  $MPa$  ( $N/mm^2$ ) para expressar a mesma dureza. De forma análoga, Colenci (2006) utilizou a unidade  $kgf/mm^2$ .

Janka (1906 apud DOYLE; WALKER, 1985), em seus ensaios de dureza com madeira, teve dificuldades em medir de modo preciso a deformação permanente produzida nesse material; portanto desenvolveu seu próprio método de ensaio, que consistia em imprimir uma esfera com diâmetro de 11,284 mm na madeira, até que a profundidade da impressão fosse igual ao raio da esfera, obtendo assim uma área projetada de 100 mm<sup>2</sup>. Apesar de Janka utilizar a convenientemente a unidade  $kgf/cm^2$  para expressar a dureza obtida por seu método, atualmente o valor é obtido apenas pela força necessária para promoção de tal endentação conforme indicado na NBR 7190 (ABNT, 1997). A modificação que Janka fez no ensaio Brinell foi rapidamente aceita ao redor do mundo. Os Estados Unidos, Canadá e Reino Unido adotaram este método e o tem mantido como norma (DOYLE, 1980).

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), e pode ser utilizada como ferramenta na

caracterização das espécies florestais (COLENCI, 2006). A dureza Janka também é fortemente correlacionada com a densidade (SWACZYNA et al., 2011).

Apesar das vantagens do ensaio de dureza Janka, alguns trabalhos sugerem possíveis limitações no método, principalmente por causa da magnitude da endentação imposta no ensaio. Segundo Doyle (1980), os danos que o ensaio proporciona na madeira tornam difícil saber que propriedade está sendo testada. O mesmo autor cita que Morath (1932) aplicou o método Brinell (para metais) em madeira. Isso permitiu o emprego de profundidades de endentações de menor magnitude, evitando consequentemente os problemas causados pela metodologia Janka.

Bektas et al. (2001) estudaram a correlação entre as metodologias Brinell e Janka, encontrando considerável índice de correlação linear ( $R^2 = 0,83$ ). Colenci (2006), no estudo da mesma correlação, encontrou índice compatível e ligeiramente superior ( $R^2 = 0,86$ ).

Schwab (1990), conforme citado por Grekin e Verkasalo (2013), comparou diferentes metodologias para medição da dureza da madeira e concluiu que o método mais adequado é o Brinell. Dubovský e Rohanová(2007) discordam desta afirmação, ao comentar que para madeiras e compósitos de madeiras, a dureza Janka é mais adequada.

Segundo Niemz e Stübi (2000), o método Janka não tem sido aceito na Europa devido a possibilidade considerável de fratura do material nos níveis elevados de compressão que são empregados. Na Europa, a dureza da madeira e de produtos a base de madeira é avaliada comumente pelo método Brinell, já o ensaio de dureza Janka é predominantemente utilizado na América do Norte e América do Sul. (HERÄJÄRVI, 2004; GREKIN; VERKASALO, 2013).

Helińska-Raczkowska e Moliński (2003) citam que a norma polonesa PN 90/D-04109, em concordância com a norma internacional ISO 3350-1975E, admite o ensaio de dureza Janka com a metade da endentação original, pois para alguns materiais, a endentação plena pode causar a ruptura do material em avaliação, comprometendo assim o resultado do ensaio.

Lewis (1968) propõe a utilização do módulo de dureza - dado pela inclinação do diagrama de força versus profundidade de endentação (ordenada abscissa respectivamente) - em vez da dureza Janka, pois ele pode ser obtido com o emprego de pequenas endentações, na faixa de 2,5mm. A norma americana ASTM D1037-78 indica a

utilização do módulo de dureza com endentações de 2,5mm, sendo esta metodologia equivalente ao método tradicional de dureza Janka (DUMAIL et al., 1998).

Além dos problemas relacionados aos elevados níveis de compressão utilizados no ensaio de dureza Janka tradicional, Doyle e Walker (1985b), comentam que neste método é difícil definir o ponto inicial de contato entre a madeira e o endentador, por causa de fatores como a rugosidade do material, formato da ferramenta e características do próprio equipamento. Estes fatores introduzem incertezas, principalmente para as endentações mais rasas.

O ensaio de dureza Brinell também apresenta algumas limitações, principalmente no que se relaciona à dificuldade em medir precisamente o diâmetro da endentação residual promovida no material testado (HANSSON; ANTTI, 2006; NIEMZ; STUBI, 2000; HERÄJÄRVI, 2004). Barbato e Desogous (1986) relataram os problemas visuais que influenciam na avaliação da endentação, dentre eles o sistema visual utilizado e aspectos psico-sensores do observador. Dumail et al. (1998) citam que a dureza Brinell no Japão (JIS) é realizada por meio da endentação de uma esfera de aço até a profundidade de  $1/\pi$  mm. A dureza é obtida pela relação entre a força aplicada e o diâmetro da endentação promovida, assim como no ensaio Brinell tradicional, porém neste caso os diâmetros são constantes e, portanto, imunes aos erros de mensuração.

Doyle e Walker (1985) citaram que a avaliação da endentação na madeira está sujeita às influências do fenômeno denominado “*sinking-in*”. Pintaude e Hoechele (2014) citam que na área metalúrgica os fenômenos *sinking-in* e *pile-up* são considerados os maiores problemas com as metodologias de determinação de módulo de elasticidade por meio de ensaios de endentação. Estes fenômenos consistem respectivamente no afundamento e remontamento do contorno da endentação, conforme ilustrado na Figura 6.

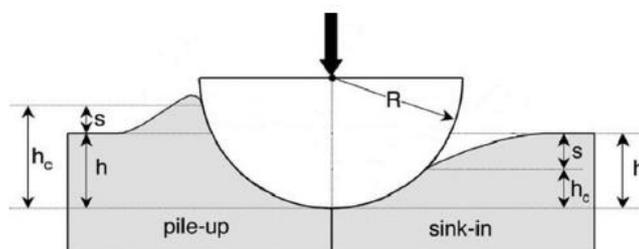


Figura 6 - Seção transversal do perfil de endentação exibindo o raio da esfera ( $R$ ), a profundidade de contato ( $h_c$ ), a profundidade de *pile-up* e *sinking-in* ( $s$ ) e a profundidade de endentação ( $h$ ).

Fonte: Adaptado de Pintaude e Hoechele (2014)

Não há relatos de problemas com o fenômeno de *pile-up* na madeira, porém o fenômeno de *sinking-in* impõe o aparecimento de endentações elípticas alinhadas com a fibra da madeira (DOYLE; WALKER, 1985), e afeta significativamente a precisão das medições de diâmetro das endentações (GREKIN; VERKASALO, 2013; HOLMBERG, 2000).

Este comportamento está relacionado à estrutura anisotrópica da madeira e impõe a necessidade de realização de duas medições ortogonais do diâmetro da endentação, uma na direção das fibras e outra perpendicular a estas (EN1534, 2000; HERÄJÄRVI, 2004; COLENCI, 2006). Grekin e Verkasalo (2013) sugerem a medição do diâmetro de endentação apenas na direção perpendicular às fibras, pois deste modo evita-se a influência do fenômeno de *sinking-in*.

Tabor (1951) comenta que para materiais elásticos, a dureza deve ser determinada sob carga, pois após a remoção desta, haverá uma pequena parcela não-permanente (recuperável) da endentação; já para materiais plásticos, a dimensão da endentação pode ser medida após a remoção da carga.

Kontinen e Nyman (1977), estudando a dureza em painéis à base de madeira, encontraram diferenças significativas ao comparar a dureza obtida pela medição da profundidade da endentação com a dureza obtida pela medição do diâmetro da endentação residual. Os pesquisadores concluíram que o melhor método é a medição da profundidade da endentação. Heräjärvi (2004), ao comparar os dois métodos, encontrou um coeficiente de correlação de Pearson significativamente alto (0,893); além disso não constatou erro sistemático de sub ou super estimação da dureza baseada na leitura do diâmetro. A conclusão do pesquisador foi que os dois métodos são igualmente confiáveis e que a utilização da profundidade da endentação é vantajosa, tendo em vista a considerável diminuição no tempo de execução do ensaio, pois todas as variáveis podem ser medidas automaticamente.

Niemz e Stübi (2000), com o uso de um equipamento dotado de um transdutor de deslocamento, utilizaram a profundidade da endentação, obtida sob carga, para cálculo da dureza Brinell. Segundo os pesquisadores, este método evita os erros relacionados à falta de precisão das medições de dureza com base no diâmetro.

### 2.3.3 Dureza dinâmica na madeira

Na madeira, tanto o limite elástico (limite de proporcionalidade) quanto a resistência máxima são maiores em carregamentos de curta duração do que em carregamentos lentos (WOOD, 1960); portanto, a velocidade de aplicação de carga é um fator importante a considerar na qualificação mecânica do material.

Considerando a velocidade de aplicação de carga, os ensaios de medição de dureza podem ser classificados em dinâmicos e estáticos (VELEZ, 1985 apud DUBOVSKÝ; ROHANOVÁ, 2007).

Os testes de dureza estáticos normalmente utilizam equipamentos de grande porte e inviabilizam a realização dos ensaios em condições de campo. Dubovský e Rohanová, (2007) comentam que o ensaio de dureza Janka é aplicável somente em condições de laboratório. Segundo Colenci (2006), a magnitude dos esforços envolvidos neste tipo de ensaio é o fator principal que dificulta a realização de ensaios em condições de campo.

Meyer et al. (2011) comentam que os testes dinâmicos de dureza na madeira, os quais permitem mobilidade, são raros.

Augutis et al. (2005) apresentaram método de endentação dinâmica (Figura 7) com objetivo de determinar a dureza local e o módulo de elasticidade de compressão de compósitos de madeira de baixa densidade (*softboard*). O método consistiu de um durômetro dinâmico com endentador cônico e dotado de transdutor de deslocamento e força. A energia necessária para promoção da endentação foi provida pela elevação de uma massa  $m$ , que após elevada a uma determinada altura, é abandonada em queda livre sobre o endentador. No momento do impacto, os sinais dos transdutores são registrados em um computador e características específicas destes sinais são extraídas, como por exemplo, tempo e força do impacto e profundidade de endentação.

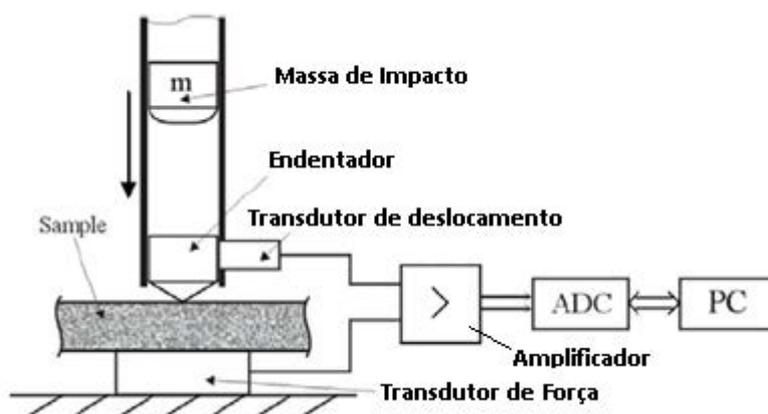


Figura 7 - Método para medição de dureza dinâmica em painéis de baixa densidade  
Fonte: Augutis et.al (2005)

Para avaliação dos resultados, os pesquisadores compararam os valores obtidos a partir dos sinais dos transdutores, com os resultados obtidos por meio do uso de dois ensaios não-destrutivos, a saber, velocidade de ondas de ultrassom e duração de impacto. Uma boa correlação ( $R^2 = 0,67$ ) foi encontrada entre a força máxima do impacto e a resistência à flexão. Como conclusão, os pesquisadores ressaltam o potencial do método para avaliação de resistência a flexão de *softboard* e a possibilidade do desenvolvimento de equipamentos portáteis para este fim.

Colenci (2006) desenvolveu um equipamento portátil para avaliação de dureza dinâmica da madeira em condições de campo com o uso da metodologia Brinell, ou seja, uso de indutor esférico e fixação da força para posterior medição da endentação. Segundo o autor, a dureza Brinell, ao contrário da dureza Janka, viabiliza ensaios em condições de campo por causa da menor magnitude dos esforços envolvidos na cravação do indutor.

O equipamento desenvolvido (Figura 8a) utiliza o mecanismo de endentação por queda livre de massa. A leitura do diâmetro da calota endentada, neste caso, foi realizada com o auxílio de uma lupa graduada, e os valores de dureza foram obtidos de acordo com a metodologia Brinell (Equação 1).

O durômetro portátil desenvolvido pelo autor, aqui referido como a primeira geração do equipamento, apresentou-se funcional, prático, de baixo custo e obteve boa correlação linear com o ensaio de dureza Janka ( $R^2 = 0,79$ ), porém algumas desvantagens foram observadas, principalmente na avaliação visual das dimensões da endentação promovida.

A fim de encontrar a melhor relação entre altura e peso da massa de impacto, Colenci (2006) realizou ensaios em quatro condições distintas denominadas E1, E2, E3 e E4, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de ensaio utilizadas por Colenci (2006)

<b>Condição</b>	<b>Altura</b>	<b>Massa</b>	<b>Energia</b>	<b>R<sup>2</sup> *</b>
E1	100 mm	1 kg	100 kgf.mm	0,770
E2	200 mm	1 kg	200 kgf.mm	0,789
E3	100 mm	2 kg	200 kgf.mm	0,793
E4	200 mm	2 kg	400 kgf.mm	0,770

\* Coeficiente de determinação da regressão linear entre as quatro condições distintas e a dureza Janka

Comparando os resultados das quatro condições com o método de referência utilizado no trabalho (dureza Janka), a energia de 200 kgf.mm apresentou melhor coeficiente de determinação.

Meyer et al. (2011), também avaliaram a melhor relação entre altura e peso da massa de impacto. Os pesquisadores utilizaram massa de 0,5 kg e oito alturas diferentes (50, 100, 200, 300, 400, 500, 750 e 1000 mm), concluindo que a altura adequada é de 300 mm. Segundo os mesmos pesquisadores, com a massa de 0,5 kg, alturas maiores que 700 mm e menores que 300 mm tornam as variações das endentações menos sensíveis às variações de dureza das espécies.

Ballarin et al. (2012) desenvolveram a segunda geração do durômetro portátil para madeiras (Figura 8b) apresentado por Colenci (2006), com objetivo de automatizar a leitura da endentação por meio de acelerômetros. Os resultados revelaram uma possível associação da aceleração, velocidade e deslocamento do equipamento com parâmetros visco-elásticos da madeira, porém algumas limitações foram encontradas, impostas principalmente pelo método de avaliação indireta empregado na ocasião (obtenção do sinal de deslocamento pela dupla integração do sinal de aceleração).

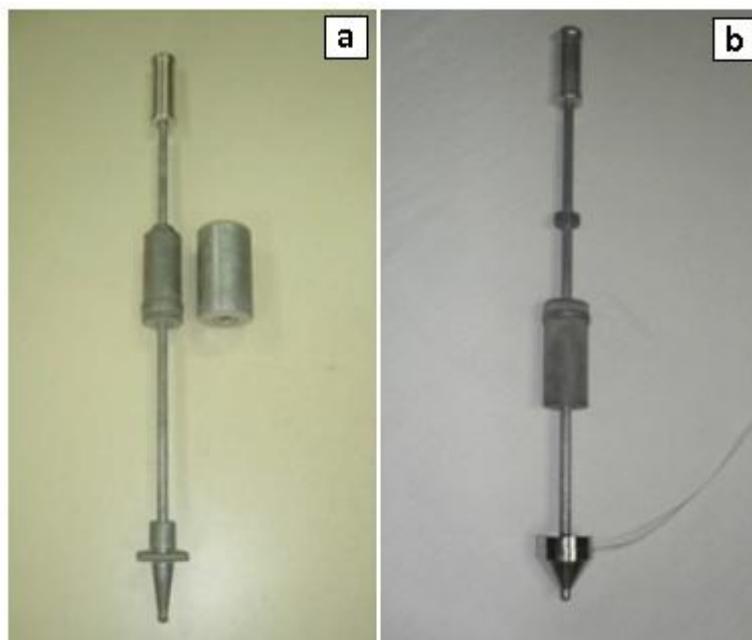


Figura 8 – Durômetro Portátil para Madeiras: a) primeira geração, b) segunda geração

Dubovský e Rohanová (2007) propõem o uso de um penetrômetro Pilodyn 6J para medição de dureza dinâmica da madeira. Diferentemente dos ensaios tradicionais de dureza, que utilizam um endentador esférico, o equipamento sugerido pelos pesquisadores emprega um pino de 2,5mm de diâmetro. A energia para promoção da penetração (6J) é fornecida pela liberação da energia de uma mola previamente comprimida, e a dureza, por sua vez, é obtida pela razão entre a força aplicada e o produto da secção transversal do pino pela profundidade da penetração do mesmo. A correlação dos resultados de dureza dinâmica, obtidos com o uso do Pilodyn, e a dureza estática, obtidos pelo método Janka, foi de  $R^2 = 0,55$  (linear). Os ensaios foram realizados em oito espécies de madeiras.

Meyer et al. (2011) apresentam um equipamento para avaliação da dureza dinâmica da madeira que utiliza uma metodologia similar a apresentada por Colenci (2006), porém com arranjo mecânico diferente, conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9 - Protótipo de equipamento para medição de dureza dinâmica. 1) massa de impacto, 2) guias e 3) esfera metálica.

Fonte: Adaptado de Meyer et al. (2011)

Os testes deste equipamento foram realizados em vinte e quatro espécies de madeiras nativas e em madeiras modificadas termicamente por processo de secagem em estufa, com temperaturas entre 180 e 220 °C. Os resultados apresentaram forte correlação entre a dureza dinâmica, avaliada pelo equipamento, e a dureza estática, avaliada por máquina de laboratório segundo a metodologia Brinell. Os índices de correlação encontrados nos testes realizados em madeiras nativas foram de  $R^2 = 0,89$  na direção axial,  $R^2 = 0,93$  na direção radial e  $R^2 = 0,92$  na tangencial.

#### **2.3.4 Fatores que influenciam a dureza da madeira**

Segundo Doyle (1980), a relação entre a dureza e a densidade da madeira tem sido discutida desde os primeiros trabalhos de Janka em 1906. A densidade é fortemente associada com a dureza da madeira (SWACZYNA et al., 2011) e tem mais influência sobre esta do que qualquer outra característica (DOYLE; WALKER, 1985). Apesar desta forte associação, a anatomia da madeira pode se sobrepôr à influência da densidade. Espécies de mesma densidade, mas com grandes diferenças na estrutura

anatômica, podem apresentar durezas diferentes significando, portanto, que a dureza carrega informações além da densidade (DOYLE, 1980).

O teor de umidade da madeira é outra característica que afeta o valor da dureza. Estudos pioneiros observaram uma evidente diminuição da dureza com o aumento do teor de umidade (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Sehlstedt-Persson (1995) investigou o efeito de diferentes níveis de temperatura na secagem por circulação de ar na dureza da madeira e concluiu que as espécies secadas em temperaturas maiores apresentaram maior dureza. Hansson e Antti (2006) estudaram a influência do método e do nível de temperatura de secagem na dureza da madeira. Concluíram que para temperaturas entre 60 e 100°C, os métodos de secagem por micro-ondas e por circulação de ar, não apresentam diferenças significativas de dureza.

Holmberg (2000) investigou a influência do ângulo entre as fibras da madeira e a força de endentação na dureza de *Pinus sylvestris L.* e afirmou que a dureza é fortemente dependente da direção das fibras.

Alguns pesquisadores abordam a influência simultânea de múltiplos fatores na dureza da madeira. Para Lassila (1926 apud HERÄJÄRVI, 2004), a dureza da madeira é dependente da força utilizada no ensaio, espécie da madeira, estrutura interna da madeira, superfície testada (radial, axial, ou tangencial), teor de umidade, temperatura e densidade. Dubovský e Rohanová (2007) definem genericamente a dureza pela função:

$$H = f(e, P, F, T, t, v, w, d) \quad (2)$$

Onde:  $H$  - dureza

$e$  - propriedades elásticas do material

$P$  - propriedades plásticas

$F$  - força utilizada no ensaio

$T$  - formato e dimensões da ferramenta de endentação

$t$  - fricção entre o endentador e o material

$v$  - velocidade de endentação

$w$  - teor de umidade

$d$  - densidade do material

Além dos fatores mencionados anteriormente, alguns tratamentos químicos também podem influenciar a dureza da madeira (IBACH, 2010).

## 2.4 Limitações mecânicas das primeiras versões do durômetro portátil para madeiras

A primeira versão do durômetro portátil para madeiras (Figura 8a), apresentada por Colenci (2006), empregava uma lupa graduada para medição da endentação promovida na madeira. A segunda versão deste equipamento (Figura 8b), desenvolvida por Ballarin et al. (2010), utilizou um acelerômetro para automatização das leituras de endentação (obtida indiretamente por meio de dupla integração do sinal de aceleração) e, com ela, calcular a dureza do material sob teste. As duas versões do durômetro tinham praticamente o mesmo arranjo mecânico, com exceção da ponteira, que foi adaptada na segunda versão para instalação do acelerômetro.

Este arranjo tem uma característica peculiar e indesejada: o impacto metal-metal, entre a massa de impacto e a ponteira, que ocorre no instante inicial da endentação. Além de dissipar parte da energia mobilizada na queda livre, proporciona um pico elevado no sinal de aceleração captado na segunda versão do equipamento. De fato, no instante inicial do impacto, a ponteira, que se encontrava em repouso, assume a velocidade da massa de impacto. Este choque proporciona uma elevada aceleração na ponteira, alcançando valores próximos de 500g (BALLARIN et al., 2010). Por este motivo, a segunda versão do equipamento utilizou um acelerômetro da marca *Measurement Specialties* modelo EGCS-DO-1000, com alcance de +/-1000 g. Os ensaios realizados com este acelerômetro foram comprometidos pelo excesso de ruídos presentes nos valores de aceleração de baixa magnitude.

O fenômeno de endentação ocorre num intervalo de tempo em torno de 0,8 a 2 milissegundos, para tanto se faz necessário o uso de elevadas taxas de aquisições – 20 kHz ou superior - para efetuar a correta amostragem do sinal.

O processo de integração realizado no sinal, devido à alta taxa de amostragem utilizada e ao excesso de ruídos nos sinais de baixa magnitude, produziu erros comprometedores no resultado final de leitura da endentação. Na ocasião foram desenvolvidos filtros eletrônicos e computacionais para minimizar o efeito dos ruídos, porém eles não se mostraram eficientes na remoção destes ruídos, pois também amorteciam o sinal principal, comprometendo-o. Este problema não foi resolvido na segunda versão do equipamento.

## 2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Os transdutores de deslocamento digitais, chamados de encoders, têm sido amplamente utilizados na indústria, oferecendo excelente resolução, imunidade a ruídos e custos relativamente baixos; além disso, o avanço tecnológico na área de processadores digitais proporcionou o desenvolvimento dos controladores digitais de sinais, fruto da convergência dos mercados de micro-controladores e processadores de sinais. Estes componentes têm se tornado cada vez mais populares viabilizando, desta forma, o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos embarcados de baixo custo e alto desempenho.

A dureza é considerada a propriedade mais importante para pisos de madeira e tem prestígio entre os principais indicadores de qualidade da madeira, pois apresenta boa correlação com outras propriedades mecânicas importantes do material, além de ser um ensaio de fácil realização.

Os métodos tradicionais para avaliação da dureza na madeira se dividem basicamente em dois grupos, representados pela dureza Janka na América e a dureza Brinell na Europa. A principal diferença entre estes métodos é que na dureza Janka se mede a força para promover uma determinada endentação; já na dureza Brinell, se mede a endentação promovida por uma determinada força. Apesar da comprovada eficácia destes ensaios, algumas críticas são direcionadas a ambos.

Para dureza Janka, a principal crítica é que o nível de endentação alcançado causa muitos danos no material embaixo e em torno do endentador. Por causa disso o ensaio não é aceito na maioria dos países da Europa. Outra crítica é que é difícil definir exatamente o ponto inicial de contato com o material, o que pode comprometer o resultado final do ensaio.

Para o ensaio de dureza Brinell na madeira, a principal crítica é a dificuldade em medir precisamente as dimensões da endentação. Por este motivo, diversas pesquisas utilizaram papel carbono entre a madeira e o endentador para realçar o contorno da endentação e facilitar a medição do seu diâmetro. Mesmo com este realce, a medição da endentação na madeira é uma tarefa questionável por causa da influencia do efeito chamado “*sinking-in*”, que é o afundamento do contorno da endentação em volta do endentador. Além deste efeito, a recuperação elástica do material após a remoção da carga, altera as dimensões da endentação. Na Europa alguns pesquisadores recomendam medir a

profundidade da endentação; já outros, recomendam medir o diâmetro desta. Há trabalhos que comparam os dois métodos, porém há divergência de opiniões sobre o assunto.

Os ensaios de dureza dinâmica têm como principal diferença dos ensaios tradicionais a velocidade de aplicação da carga. Estes ensaios são raros, e têm sido relatados nos últimos anos, destacando como principal vantagem a facilidade de aplicação em condições de campo. De fato, a dureza Janka é aplicável primordialmente em laboratório por causa da magnitude das forças envolvidas no ensaio e, tanto para dureza Janka quanto para a dureza Brinell é difícil controlar a velocidade de carregamento com equipamentos portáteis.

As pesquisas sobre dureza dinâmica na madeira apresentadas nos últimos anos têm indicado um campo fértil para investigação. Os resultados já apresentados revelaram excelentes índices de correlação na associação entre os valores de dureza dinâmica com os ensaios tradicionais de dureza por endentação. Além disso, as conveniências operacionais envolvidas nos ensaios dinâmicos têm incentivado o prosseguimento destes estudos.

Dentre os durômetros portáteis desenvolvidos nestas pesquisas, as duas primeiras gerações do equipamento concebido pelo Grupo de Pesquisa em Produtos Florestais da FCA / UNESP – Botucatu possibilitaram medições consistentes de dureza dinâmica e boa correlação com a dureza Janka. Apesar dos notáveis resultados obtidos nas primeiras gerações deste equipamento, a necessidade de automatização de suas medições foi destacada como objeto de pesquisas futuras.

Portanto, o desenvolvimento de uma versão automatizada de um durômetro portátil para avaliação da dureza dinâmica da madeira se mostra oportuno, tanto por seu valor tecnológico, quanto por seu apelo investigativo para o estudo da dureza dinâmica na madeira.

### **3. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO E PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Características mecânicas do durômetro portátil para madeiras – DPM3**

O durômetro portátil para madeiras apresentado nesta pesquisa foi desenvolvido a partir das duas primeiras gerações do durômetro, apresentadas respectivamente por Colenci (2006) e Ballarin et al. (2010). Por este motivo o equipamento foi denominado Durômetro Portátil para Madeiras - Terceira Geração (DPM3).

O DPM3 herdou das gerações anteriores do durômetro, o princípio de mobilização de energia (queda livre de massa) e a utilização de endentador esférico. Para automatização das leituras de endentação optou-se pelo uso de um transdutor de deslocamento linear e circuito eletrônico microprocessado e portátil.

O arranjo mecânico do equipamento foi modificado para comportar o transdutor de deslocamento e prover a referência de posição entre a madeira e o endentador conforme ilustrado na Figura 10.

Nas gerações anteriores do equipamento, a guia do movimento vertical consistiu em uma haste por onde se deslocava a massa de impacto (Figura 10a). Este arranjo proporcionava simplicidade de construção e operação, porém não contribuía para instalação do transdutor de deslocamento. Na terceira geração (Figura 10b), a guia foi construída de modo a apoiar-se na madeira no momento do ensaio proporcionando, desta forma, a referência de posição para o transdutor de deslocamento que está fixado nela.

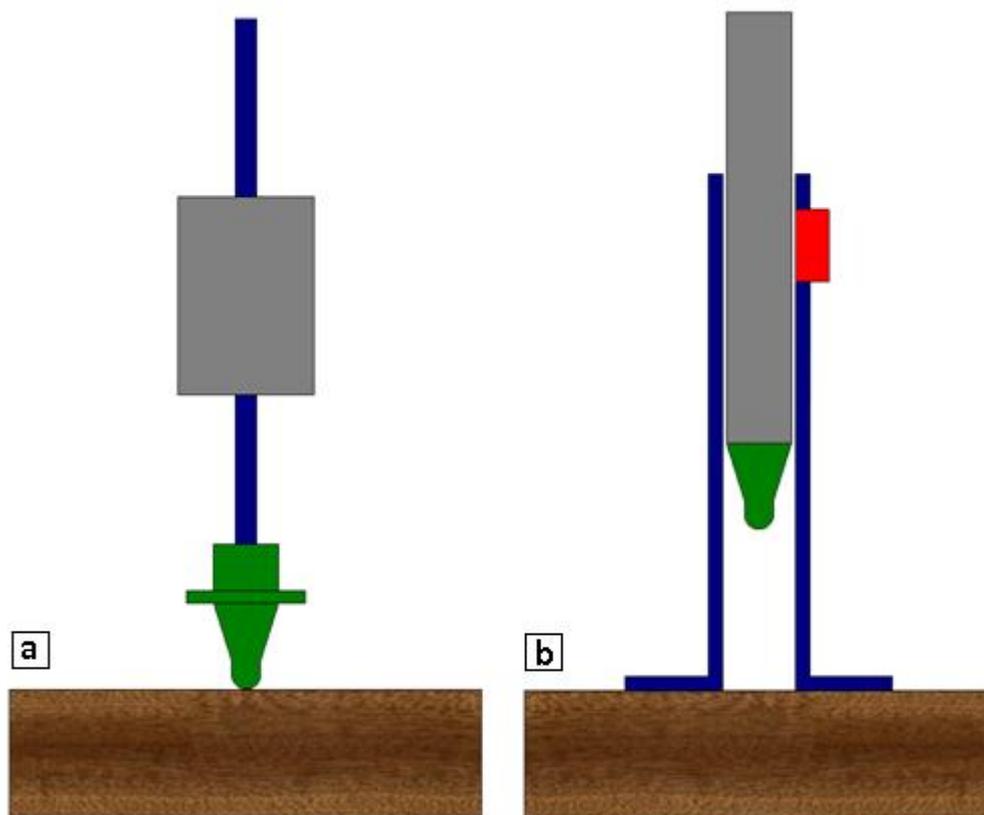


Figura 10 - Desenho esquemático funcional da primeira (a) e terceira (b) geração do durômetro portátil para madeiras. Endentador (verde), Guia (Azul), Massa de impacto (cinza), transdutor de deslocamento (vermelho), material em avaliação (textura de madeira).

No DPM3 a massa de impacto foi mecanicamente conectada ao endentador evitando, deste modo, a dissipação de energia para promover sua aceleração. Apesar disso, o endentador pode ser substituído em havendo conveniência de realização de ensaios com endentadores de diâmetros ou formatos diferentes.

A base da guia vertical foi construída na forma de um flange perpendicular, que têm as funções de garantir a estabilidade mecânica do equipamento sobre a madeira e permitir o apoio do operador sobre o equipamento no momento da realização do ensaio.

A massa de impacto foi equipada com um manípulo de operação, por meio do qual o operador realiza a elevação da mesma (Figura 11). A altura ideal de elevação da massa de impacto foi garantida por uma limitação mecânica imposta na guia lateral. O acabamento do manípulo de operação foi recartilhado na área de contato do operador, para oferecer maior aderência no momento da operação.



Figura 11 – Durômetro Portátil para Madeiras: a) equipamento na posição vertical, b) detalhe do painel eletrônico, c1) flange, c2) endentador, c3) manípulo e c4) suporte principal

O formato da seção transversal da massa de impacto, apresentado no Apêndice 1 - Figura I-5, foi projetado com os objetivos de: a) diminuir a área de contato com a guia e conseqüentemente reduzir o atrito durante a queda da massa; b) calibrar a massa de impacto para 1 kg; c) prover espaço físico para acomodação da fita magnética.

Com o objetivo de garantir a resistência à corrosão e desgaste, o equipamento foi construído em aço inoxidável AISI 316 (cromo-níquel molibdênio, inoxidável austenítico, não-temperável, não-magnético), com exceção do suporte do transdutor de deslocamento, que foi confeccionado em alumínio comercial.

O custo do equipamento, incluindo componentes mecânicos e eletrônicos (transdutor de deslocamento, processador, *display* e acessórios) foi de U\$ 680, sendo o transdutor de deslocamento responsável por 50% deste valor.

Os detalhes construtivos do equipamento estão apresentados no Apêndice 1 deste documento.

### **3.2 Automação eletrônica do durômetro Portátil para madeiras – DPM3**

O transdutor de deslocamento empregado no DPM3 foi um encoder magnético incremental da marca Baumer®, modelo MLFK-10T7105-N100, que opera em conjunto com uma fita magnética com alternância de pólos a cada 2 mm. O transdutor foi fixado na guia do DPM3 e a fita magnética foi fixada na massa de impacto, desta maneira as medições de deslocamento foram efetuadas na direção perpendicular à face do material ensaiado.

Este sistema de medição oferece resolução de 5 $\mu$ m e acurácia de +/- 10 $\mu$ m, podendo registrar medições de posição em situações com velocidades de deslocamento de até 10 m/s (informações fornecidas pelo fabricante).

Para processamento do sinal de deslocamento e cálculo da dureza, foi empregado um controlador digital de sinais (DSC) do modelo dsPIC33F fabricado pela empresa MICROCHIP. Este DSC foi programado com um algoritmo computacional desenvolvido especificamente para o DPM3.

O algoritmo desenvolvido define o comportamento lógico do DSC e coordena todas as tarefas e funções elementares do processador, a saber: elaboração dos conteúdos exibidos no *display* de operação, chamada das telas conforme comandos de

navegação inseridos no teclado, interpretação do sinal do encoder, registro de eventos de ensaio, medição da endentação, cálculo da dureza e transmissão de dados para outros dispositivos eletrônicos.

O protótipo do circuito eletrônico foi montado em uma placa eletrônica de desenvolvimento *Easy 24-33*® fabricada pela empresa MikroElectronica®, onde foram conectados o encoder magnético, um *display* de cristal líquido, um conjunto de teclas de operação, uma interface de comunicação serial RS232, um módulo de comunicação sem fio no protocolo *BlueTooth*®, um circuito de conversão do sinal do encoder e o próprio DSC dsPIC33F, conforme representado na Figura 12.

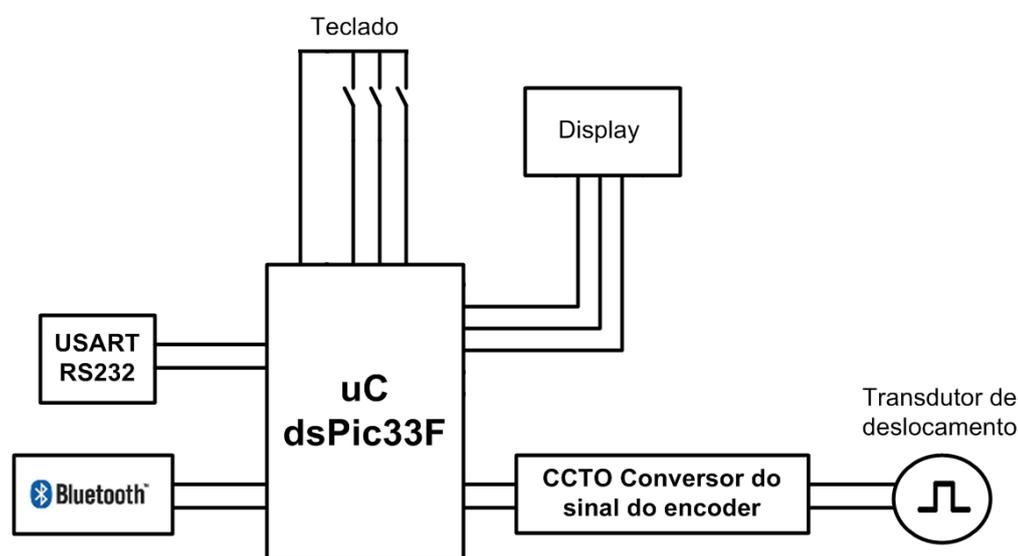


Figura 12 - Esquema geral das conexões do circuito eletrônico.

Após a validação prática do circuito eletrônico, uma placa de circuito impresso foi confeccionada para conter todos os componentes descritos anteriormente em um único dispositivo de dimensões reduzidas. Nesta placa foi desenvolvido um circuito de fonte interna alimentado por bateria, oferecendo a característica de portabilidade ao durômetro.

O circuito de comunicação serial RS232 foi instalado como alternativa para transferência dos dados dos ensaios para um computador, porém este recurso não foi utilizado na pesquisa, a não ser nos testes preliminares realizados no protótipo.

Além da automação das leituras de dureza, o DPM3 foi concebido com o objetivo de automatizar a produção automática de relatórios de ensaios. Por este motivo, o módulo de comunicação sem fio (*BlueTooth®*) foi adicionado ao conjunto eletrônico, possibilitando assim a transferência de dados do DPM3 para outros dispositivos portáteis, tais como *smartphones* ou *tablets*.

Para recepção dos dados de ensaio foi desenvolvido um programa computacional na linguagem Java para funcionar em sistema operacional móvel *Android*. Este programa tem as funções de receber, exibir em gráfico e salvar os dados transmitidos pelo DPM3 além de produzir os relatórios de ensaio citados anteriormente.

### **3.3 Características funcionais do Durômetro Portátil para Madeiras – DPM3**

O DPM3 utilizou a energia de 200 kgf.mm oriunda da condição E2 descrita por Colenci (2006), ou seja, altura de 200 mm e massa de 1 kg. Esta relação proporcionou a construção de um equipamento leve e de fácil manuseio, sem comprometer a sensibilidade do equipamento às variações de dureza dos materiais ensaiados.

Optou-se por manter o diâmetro do endentador esférico em 10 mm como utilizado nas gerações anteriores do equipamento. Este diâmetro poderia ser escolhido arbitrariamente porém, para madeira, o valor de 10 mm tem se mostrado sensível (MEYER et al., 2011).

A referência de posição inicial do endentador é realizada com o mesmo em contato com a madeira, no instante anterior ao ensaio. A partir desta referência, os valores positivos de posição indicam a altura do endentador em relação ao material ensaiado e os valores negativos indicam a profundidade da endentação promovida.

Ao contrário dos ensaios de dureza estáticos, os ensaios dinâmicos, sobretudo aqueles com mobilização de energia por queda livre de massa, estão mais vulneráveis aos erros de medição de diâmetro da endentação, pois promovem endentações complementares devido ao ricochete do endentador, que ocorre após o primeiro impacto (COLENCI, 2006). No DPM3, a profundidade da endentação, medida sob carga no momento da primeira endentação (primeiro impacto), foi utilizada para cálculo da dureza evitando, desta forma, os erros relacionados à medição do diâmetro da endentação.

Usando a profundidade da endentação, a dureza pode ser calculada com base na metodologia Brinell (Equação 1), ou seja, pela razão entre a força aplicada e a

área da calota esférica promovida pela endentação. Porém, dada a natureza do ensaio dinâmico, a força deve ser abordada de modo peculiar. Na metodologia Brinell convencional, a força é estática e garantida durante o ensaio pelo equipamento utilizado; já com o DPM3, a força é dinâmica (mobilizada pela queda livre de massa) e se dissipa no decorrer do ensaio.

Colenci (2006) utilizou a energia disponibilizada na queda livre da massa, dada em  $kgf.mm$ , no lugar da força prevista na metodologia Brinell. Meyer et al. (2011) utilizaram o momento linear da massa de impacto no instante inicial da endentação, dado em  $kg.m.s^{-1}$ . Estas abordagens consideram apenas a dinâmica da mobilização da energia no instante anterior ao impacto, desprezando as características do próprio fenômeno da endentação. Para materiais mais duros, onde se espera endentações de menor magnitude, o tempo da endentação é menor do que o tempo demandado para os materiais de menor dureza, portanto o impulso da força resultante no fenômeno da endentação é diferente para cada caso.

Com o objetivo de prover um conceito mais compreensível para a dureza dinâmica, o DPM3 leva em consideração a força média resultante do impulso promovido pelo fenômeno da endentação de acordo com a equação:

$$HD = \frac{F}{\pi Dh} = \frac{m \frac{\Delta v}{\Delta t}}{\pi Dh} \quad (3)$$

Onde:  $HD$  - dureza dinâmica (MPa)

$F$  - força média resultante do impulso da endentação (N)

$D$  - diâmetro do indentedor (mm)

$H$  - profundidade de endentação (mm)

$m$  - massa (kg)

$\Delta v$  - variação da velocidade no momento da endentação ( $m.s^{-1}$ )

$\Delta t$  - tempo de endentação (s).

O tempo de endentação se inicia no instante em que o indentedor toca na madeira e termina no momento em que a profundidade de endentação máxima do primeiro impacto é alcançada.

O circuito eletrônico do DPM3 realizou as medições de velocidade, tempo e profundidade de endentação e calculou a dureza, exibindo-a no display instantaneamente após da realização de cada ensaio.

A velocidade de impacto da massa poderia ser considerada constante, tendo em vista que a altura da queda livre e a massa são constantes, porém a medição desta variável foi considerada para evitar problemas de operação incorreta ou de burla proposital dos resultados de dureza do equipamento. Considerando a possibilidade de o operador influenciar a dinâmica da queda da massa de impacto, o DPM3 verifica a velocidade máxima do endentador no momento antes do ensaio e rejeita os ensaios com desvio de  $\pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Por este mesmo motivo, o algoritmo do processador do DPM3 só permite a realização do ensaio se a altura máxima de elevação da massa for atingida.

Para cada ensaio foram armazenadas 8092 amostras do sinal de deslocamento do endentador, a uma taxa de aquisição de 20 kHz, compondo desta maneira, um registro com duração de 404,6 milissegundos.

### **3.4 Material e métodos do programa experimental**

Para efeitos de calibração do durômetro portátil desenvolvido (DPM3), foram realizados ensaios de dureza Janka na direção perpendicular à grã da madeira, em uma máquina universal de ensaios servo-controlada da marca EMIC, modelo DL 30000, seguindo, em geral, os requisitos da NBR 7190 (ABNT, 1997). A dureza HD foi calculada alternativamente com uso da Equação 3 e os seus resultados foram associados ao método de referência – Janka – por meio de regressão linear.

Os ensaios de calibração foram realizados em cento e doze corpos de prova (c.p.) provenientes de sete espécies de eucalipto. Para cada espécie foram extraídos dezesseis c.p. com as dimensões (50 mm x 50 mm x 150 mm), onde foram realizados os ensaios de dureza. Para cada c.p. foram realizados dois ensaios, um de dureza Janka convencional e outro de dureza dinâmica, obtida com uso do DPM3. A Tabela 2 apresenta as características das espécies utilizadas na etapa de calibração.

Tabela 2 – Espécies utilizadas no lote de calibração do DPM3

Grupo	Espécie	Idade de plantio (anos)	Densidade média <sup>(*)</sup> (kg.m <sup>-3</sup> )
1	<i>E.maculata</i>	35	810
2	<i>E.microcorys</i>	35	770
3	<i>E. tereticornis</i>	40	950
4	<i>E. citriodora</i>	44	980
5	<i>E. saligna</i>	50	690
6	<i>E. dunnii</i>	20-23	750
7	<i>E. viminalis</i>	20	720

(\*) – Densidade aparente baseada na massa e volume com teor de umidade em 12% - valores reportados pelos fornecedores

Para validação do modelo obtido na etapa de calibração, foram realizados ensaios em cinco espécies de eucalipto de origens distintas daquelas utilizadas na calibração. De cada espécie, apresentada na Tabela 3, foram extraídas seis vigas (800 mm x 170 mm x 70 mm).

Tabela 3 – Espécies utilizadas no lote de validação do DPM3

Grupo	Espécie	Densidade média (kg.m <sup>-3</sup> )
1	<i>E.grandis</i>	804
2	<i>E.viminalis</i>	755
3	<i>E. saligna</i>	916
4	<i>E. tereticornis</i>	1011
5	<i>E. citriodora</i>	914

Em cada viga foram realizados dez ensaios de dureza Janka e dez ensaios de dureza dinâmica. Na primeira etapa, foram realizados cinco ensaios intercalados de cada metodologia conforme ilustrado na Figura 13. Após esta etapa, as vigas foram submetidas a uma etapa de aplainamento com objetivo de remover a superfície comprometida pelos ensaios anteriores. Finalmente, foram realizados mais cinco ensaios intercalados de cada metodologia nas superfícies aplainadas (800 mm x 160 mm x 70 mm). Para cada ensaio Janka, dois valores distintos de dureza foram medidos automaticamente pela máquina de laboratório, um com meia endentação (2,82 mm) e outro com endentação completa (5,64mm). Adicionalmente, o diagrama carga-deslocamento de cada ensaio Janka foi registrado, permitindo a avaliação completa deste ensaio, desde o contato do endentador com a madeira, até a endentação completa.

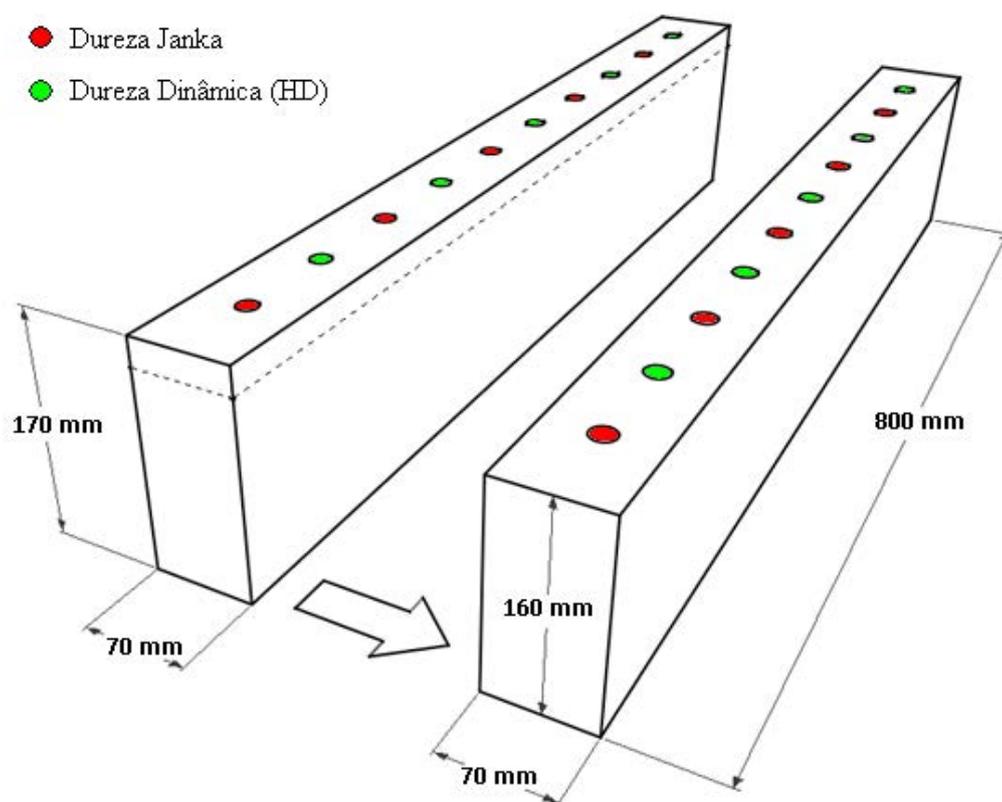


Figura 13 - Esquema geral com as posições para realização dos ensaios de dureza

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Tipologia geral do fenômeno observado com o sensor de deslocamento

Com o uso do transdutor de deslocamento linear, o Durômetro Portátil DPM3 promoveu leituras rápidas e de fácil obtenção, revelando valores consistentes de endentação. O valor da dureza dinâmica HD, calculado pelo processador eletrônico, foi exibido em um *display* de cristal líquido (LCD).

A Figura 14 apresenta o fenômeno geral e completo de endentação na madeira registrado pelo circuito eletrônico do Durômetro Portátil DPM3.

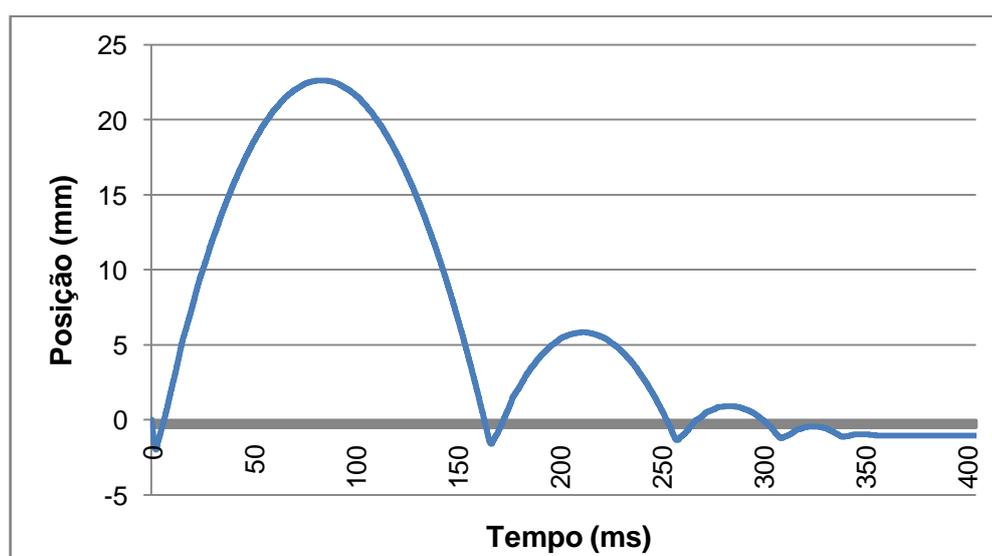


Figura 14 – Sinal completo do ensaio, desde o impacto inicial até o amortecimento completo dos movimentos dos corpos envolvidos.

Os valores positivos de posição correspondem à altura da massa em relação a sua referência inicial (em contato com a madeira no instante anterior ao ensaio) e os valores negativos correspondem à endentação promovida no material. O fenômeno de endentação, observado nos intervalos de 0 a 2 ms é seguido por um movimento de retorno da massa de impacto, causado pela reação elástica do material ensaiado. Este movimento de retorno impõe à massa de impacto a recuperação de parte de sua altura inicial, o que, conseqüentemente, promove uma nova endentação que, por sua vez, será seguida por outra reação de retorno e, assim, sucessivamente, até que a energia do sistema seja dissipada por completo. A dureza dinâmica (Equação 3) foi calculada com base no valor da profundidade de endentação medida exclusivamente no primeiro impacto (Figura 15). Os valores posteriores de profundidade de endentação não foram utilizados.

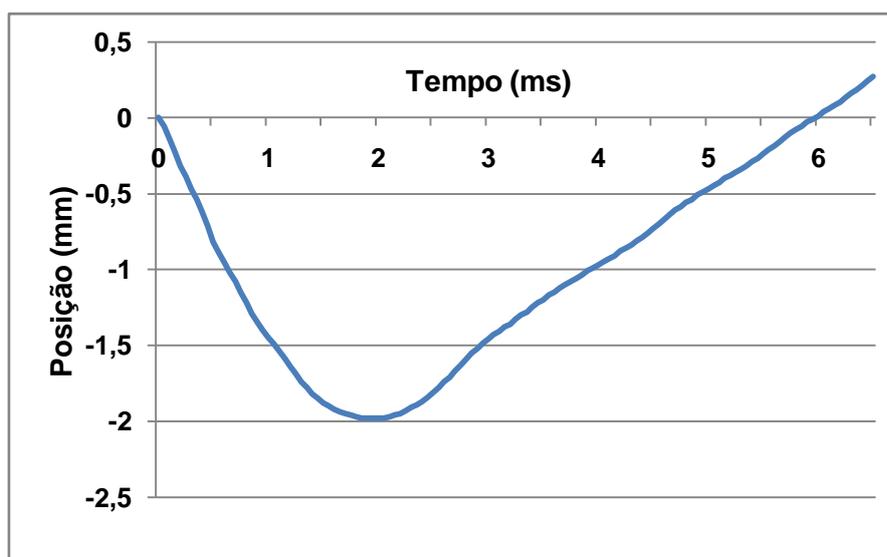


Figura 15 – Sinal de deslocamento registrado no primeiro impacto do ensaio de dureza dinâmica HD.

A endentação foi medida sob carga, e não após o ensaio, prevenindo, desta forma, a influência do fenômeno de recuperação, presente nos materiais resilientes como a madeira. Além disso, ao medir a profundidade da endentação ao invés da área endentada, o Durômetro Portátil DPM3 evitou o efeito do fenômeno “*sinking-in*” reportado pelos pesquisadores Doyle e Walker (1985), Holmberg (2000) e Grekin e Verkasalo (2013).

## 4.2 Ensaio de calibração

A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva das medições de dureza Janka e da dureza HD, obtida pelo Durômetro Portátil DPM3, nos ensaios realizados no lote de calibração. Os resultados completos obtidos nesses ensaios estão reportados nas tabelas do Apêndice 2.

Tabela 4 – Estatística descritiva da dureza Janka e da dureza HD

Estatística Descritiva	Dureza Janka	Dureza HD
	(MPa)	(MPa)
Média	68,53	34,52
Desv. Padrão	24,34	11,81
Mínimo	26,70	12,63
Máximo	135,40	57,96
CV(%)	35,53	34,22
N	112	112

Os valores de dureza dinâmica apresentados pelo DPM3 (Equação 3) foram aproximadamente a metade do valor de dureza Janka e o coeficiente de variação, em torno de 35%, foi praticamente o mesmo para as duas durezas.

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,873$ ) revelou uma associação de moderada para forte entre a dureza dinâmica e a dureza Janka (Figura 16). O resultado desta associação foi da mesma magnitude que os resultados encontrados por COLENCI (2006) e BEKTAS et al. (2001) no estudo da correlação entre as durezas Brinell e Janka.

O DPM3 utilizou a força média resultante do impulso promovido pela endentação, como referência de força para cálculo da dureza dinâmica. Estudos anteriores com equipamentos de medição de dureza dinâmica, com o mesmo princípio de mobilização de energia, utilizaram a energia acumulada na queda livre da massa (COLENCI, 2006, BALLARIN et al., 2012) ou o momento linear desta massa no momento do impacto (MEYER et al., 2011), conforme apresentado na Tabela 5.

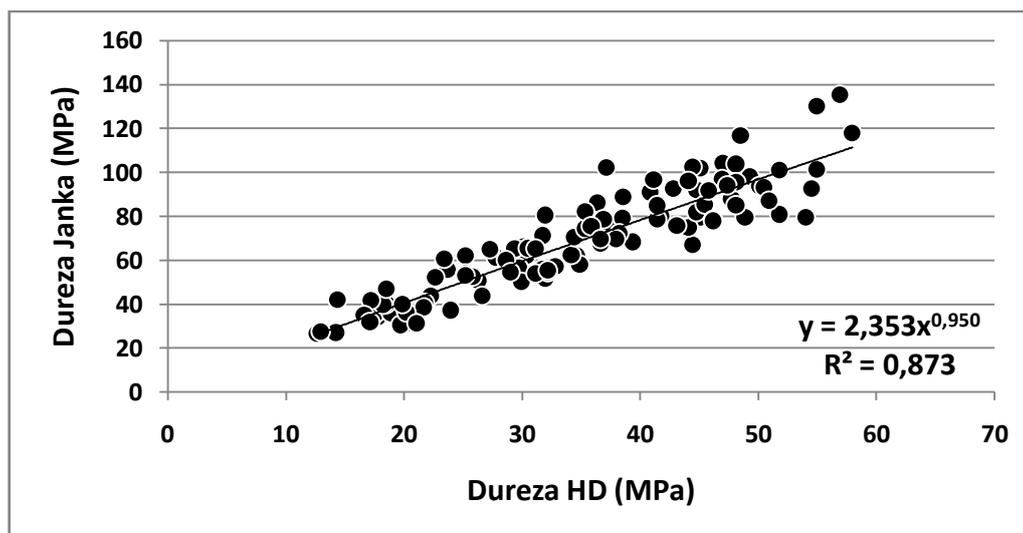


Figura 16 - Dureza Janka versus dureza HD medida pelo Durômetro Portátil DPM3

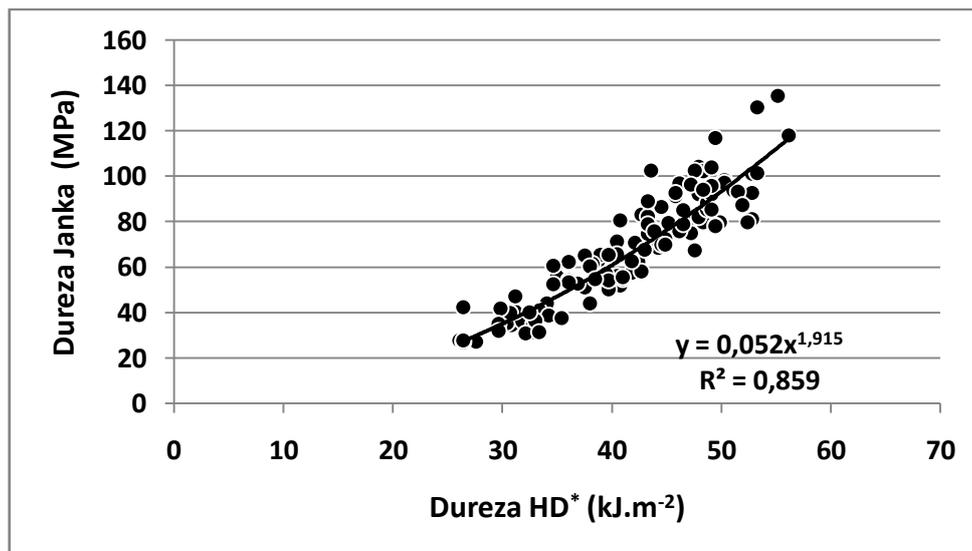
Tabela 5 – Referências alternativas para força utilizadas em pesquisas anteriores

Pesquisadores	Referências*
Colenci (2006)	200 kgf.mm
Meyer et al. (2011)	1,98 kg.m.s <sup>-1</sup>
Ballarin et al.(2012)	1,96 J

\* utilizado como alternativa para a força proposta no ensaio Brinell

Com o objetivo de avaliar a eficiência da utilização da força média resultante do impulso da endentação, os resultados de dureza obtidos pelo DPM3 (HD), foram comparados com os resultados de dureza obtidos utilizando a energia mobilizada na queda livre (HD\*), conforme proposto por Ballarin et al. (2012).

A Figura 17 apresenta o resultado da comparação entre a dureza Janka e os valores de dureza HD\*, obtidos com o uso do DPM3.



(\*) - dureza calculada conforme metodologia proposta por Ballarin et al. (2012)

Figura 17 - Dureza Janka versus dureza HD\* medida pelo Durômetro Portátil DPM3

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,859$ ), apesar de inferior ao encontrado com o uso da força média resultante do impulso da endentação ( $R^2 = 0,873$ ), ainda foi satisfatório, porém o componente exponencial do modelo ajustado ( $x^{1,915}$ ) foi significativamente superior ao ajuste realizado com a dureza HD ( $x^{0,95}$ ).

A Figura 18 apresenta a comparação dos modelos ajustados por regressão exponencial para as durezas HD e HD\*. Como pode ser observado, a relação entre dureza HD e a dureza Janka é praticamente linear para durezas Janka até 120 MPa, ao passo que a dureza HD\* apresenta caráter evidentemente curvilíneo, dado pela relação exponencial desta dureza com a dureza Janka.

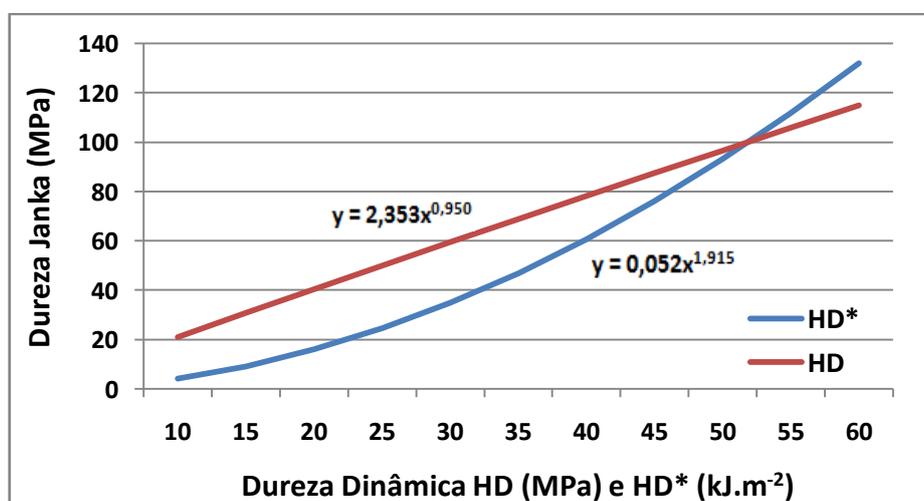


Figura 18 – Comparação entre os modelos ajustados para das durezas HD e HD\*

Apesar da dureza HD obter melhor ajuste do modelo por meio de regressão exponencial ( $y = 2,353 x^{0,95}$ ,  $R^2 = 0,873$ ), o ajuste efetuado por regressão linear ( $y = 1,89 x + 3,263$ ,  $R^2 = 0,841$ ) também expressou boa correlação com a dureza Janka.

Na comparação entre as durezas HD e HD\*, também pode ser observada uma menor sensibilidade da metodologia utilizada para cálculo da dureza HD\*, evidenciada pelo baixo coeficiente de variação, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação de resultados de diferentes metodologias para cálculo de dureza.

Estadística	Dureza Janka	Dureza HD	Dureza HD*
Descritiva	(MPa)	(MPa)	(kJ.m <sup>-2</sup> )
Média	68,53	34,52	41,69
Desv. Padrão	24,34	11,81	7,43
Mínimo	26,70	12,63	26,10
Máximo	135,40	57,96	56,21
CV(%)	35,53	34,22	17,83
N	112	112	112

(\*) - dureza calculada conforme metodologia proposta por Ballarin et al. (2012)

O DPM3 promoveu endentações de baixa magnitude (Tabela 7) quando comparadas à endentação fixa do ensaio de dureza Janka que, por sua vez, é de 5,64 mm. Esses valores de endentação foram medidos sob carga e no primeiro evento de endentação, uma vez que o equipamento monitora o fenômeno completo da endentação, desde o primeiro impacto até o amortecimento completo dos movimentos dos corpos envolvidos (Figura 14). A endentação média de 1,55 mm (variando de 1,11 mm a 2,39 mm) foi consideravelmente menor que a endentação fixa de 5,64 mm, utilizada no ensaio de dureza Janka.

Buscando um melhor entendimento da relação entre a dureza HD e a dureza Janka, uma nova associação entre os resultados foi realizada, conforme apresentado da Figura 19. Nesta associação, a dureza Janka foi obtida com a metade da endentação convencionalmente utilizada para o ensaio Janka. Como mencionado por Helińska-Raczkowska e Moliński (2003), a norma Polonesa PN 90/D-04109 e a norma internacional ISO 3350-1975E admitem o ensaio de dureza Janka com a metade da endentação original (2,82mm), considerando que com endentação plena (5,64 mm) é

possível ocorrer a ruptura da madeira em torno do endentador, fato este observado em alguns dos ensaios de dureza Janka realizados neste programa experimental.

Tabela 7 – Estatística descritiva das medições de endentação do DPM3

Estatística Descritiva	Endentação (mm)
Média	1.55
Desvio Padrão	0.31
Mínimo	1.11
Máximo	2.39
CV(%)	19.83
N	112

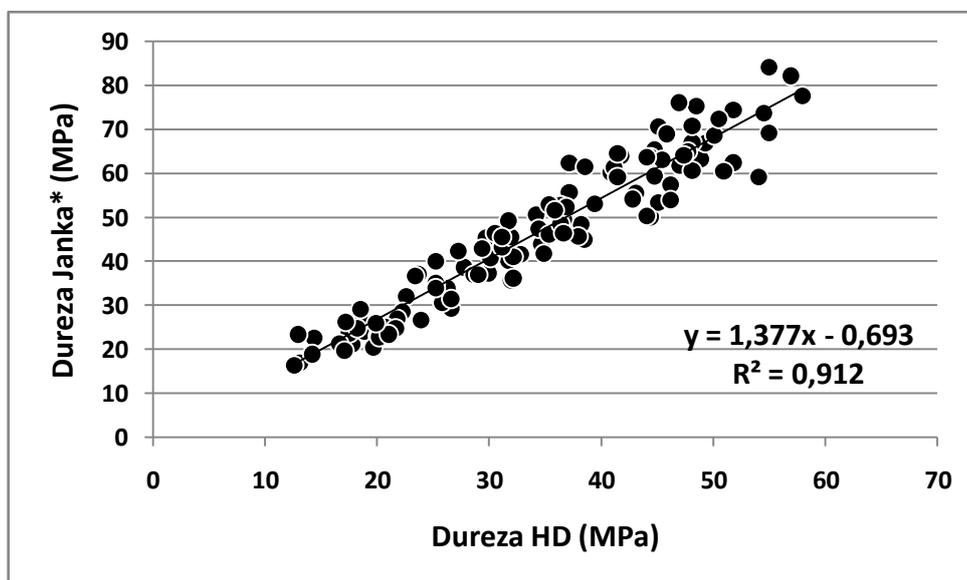


Figura 19 - Dureza Janka\* (endentação de 2,82 mm) versus dureza dinâmica HD

Esta nova associação (Figura 19) revelou uma forte correlação ( $R^2 = 0,912$ ) e baixa dispersão dos resultados, quando comparada com aquela dos dados da Figura 16. Estes resultados reforçam o propósito original do equipamento, o de realizar endentações mais rasas que as promovidas pelo ensaio de dureza Janka.

O modelo foi satisfatoriamente ajustado por regressão linear ( $y = 1,377x - 0,693$ ), o que confirma a validade da metodologia para cálculo da dureza HD (Equação 3). A força média resultante do impulso da endentação, apresentada na Equação 3, em outras palavras, é o produto da massa de impacto (1 kg) pela taxa de amortecimento de sua velocidade (desaceleração) no momento da endentação. Ao considerar esta variável,

o valor da dureza dinâmica HD pondera, para cada diferente profundidade de endentação, a força necessária para promoção daquela endentação específica. Este tipo de medição de dureza não poderia ser realizada sem o uso de instrumentação adequada, pois os tempos de endentação ocorrem em intervalos de curtíssima duração (Tabela 8).

Tabela 8 – Estatística descritiva das medições de tempo de endentação do DPM3

Estatística Descritiva	Tempo de endentação (ms)
Média	1,27
Desvio Padrão	0,26
Mínimo	0,95
Máximo	2,05
CV(%)	20,66
N	112

Os tempos de endentação têm forte dependência da profundidade de endentação. A Figura 20 apresenta o diagrama de deslocamento (profundidade de endentação) registrado pelo DPM3 no domínio do tempo, para três níveis distintos de dureza HD (baixo, médio e alto).

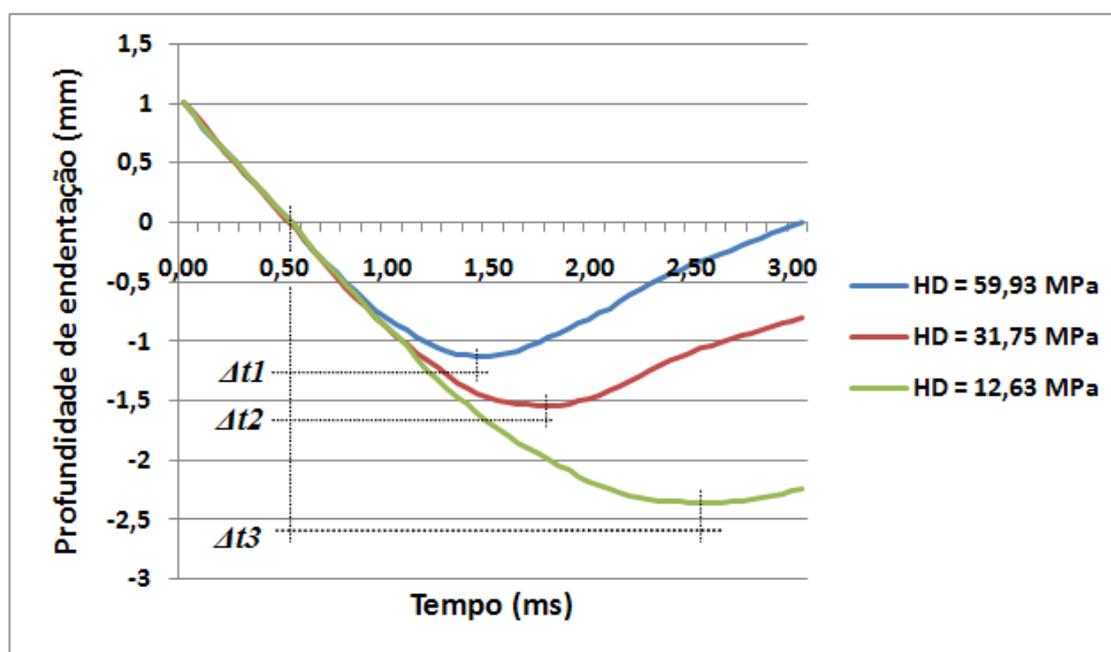


Figura 20 - Diagrama de deslocamento no domínio do tempo para três ensaios distintos

Como podem ser observados, os tempos de endentação ( $\Delta t1$ ,  $\Delta t2$  e  $\Delta t3$ ) são diferentes e proporcionais à endentação para cada ensaio. O ensaio de maior dureza apresenta a menor profundidade de endentação e, conseqüentemente, o menor tempo; de forma análoga, os ensaios com durezas menores, apresentam endentações e tempos maiores, conforme exibido na Figura 21.

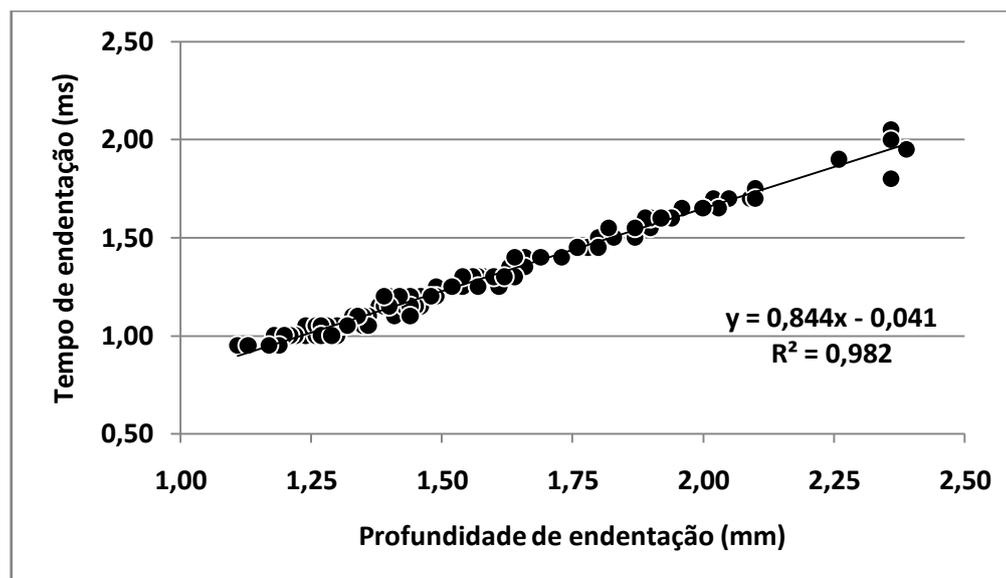


Figura 21 – Correlação entre tempo e profundidade de endentação

A fortíssima correlação entre os valores ( $R^2 = 0,982$ ) indica que as variações da profundidade de endentação podem ser seguramente explicadas pelo tempo de endentação e vice-versa. Desta maneira, os equipamentos desprovidos de instrumentação adequada para medição do tempo de endentação, poderiam eventualmente estimar com precisão este valor com base na profundidade de endentação, pela expressão  $y = 0,844x - 0,041$ , onde  $x$  é a variável medida em milímetro e  $y$  a variável estimada em milissegundo.

As Figuras 16, 17 e 19 revelam uma maior dispersão dos resultados para durezas de níveis elevados, que podem ser atribuídos à função racional ( $f(x)=k.x^{-1}$ ) que rege a dureza Brinell e particularmente a dureza HD. De fato, para níveis elevados de dureza (em outras palavras, baixos níveis de endentação) menores variações de endentação promovem grandes variações no valor da dureza como exemplificado na Figura 22.

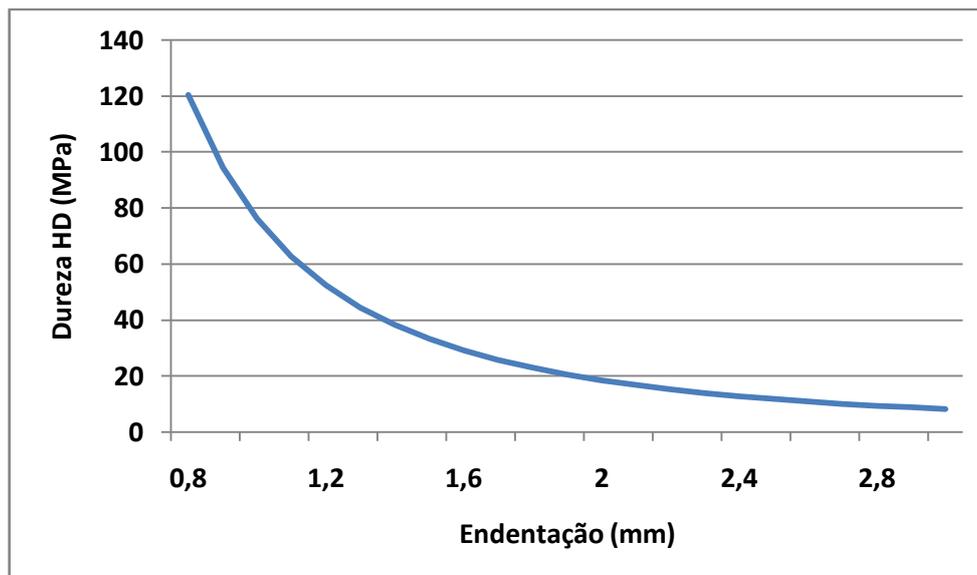


Figura 22 - Relação teórica entre dureza HD e profundidade de endentação.

Esta característica não-linear entre a dureza dinâmica HD e profundidade de endentação está provavelmente relacionada à geometria esférica do endentador. Segundo Doyle (1985b), a cunha é o único formato de endentador que assegura o princípio de similaridade geométrica, ou seja, as endentações mais profundas são apenas uma versão ampliada das endentações mais rasas; todavia os ensaios de dureza que utilizam endentadores esféricos, não garantem esta característica. Este fato não desabona o uso destes últimos para avaliação de dureza pois a dureza Janka, por exemplo, apresenta boa correlação com outras importantes propriedades mecânicas da madeira como a compressão paralela e normal às fibras (IBAMA, 1993; COLENCI, 2002) além de ser fortemente correlacionada com a densidade (SWACZYNA et al., 2011).

Alguns ensaios de dureza Janka, realizados neste programa experimental, confirmaram a crítica direcionada ao método, qual seja, os níveis de compressão alcançados com a endentação plena (5,64 mm) são exagerados para algumas madeiras, podendo causar a ruptura das fibras abaixo do endentador (DOYLE, 1980). Este fenômeno, particularmente observado no diagrama carga-deslocamento dos ensaios de dureza Janka (Figura 23), não foi observado nos ensaios de dureza dinâmica HD devido à menor magnitude das endentações realizadas.

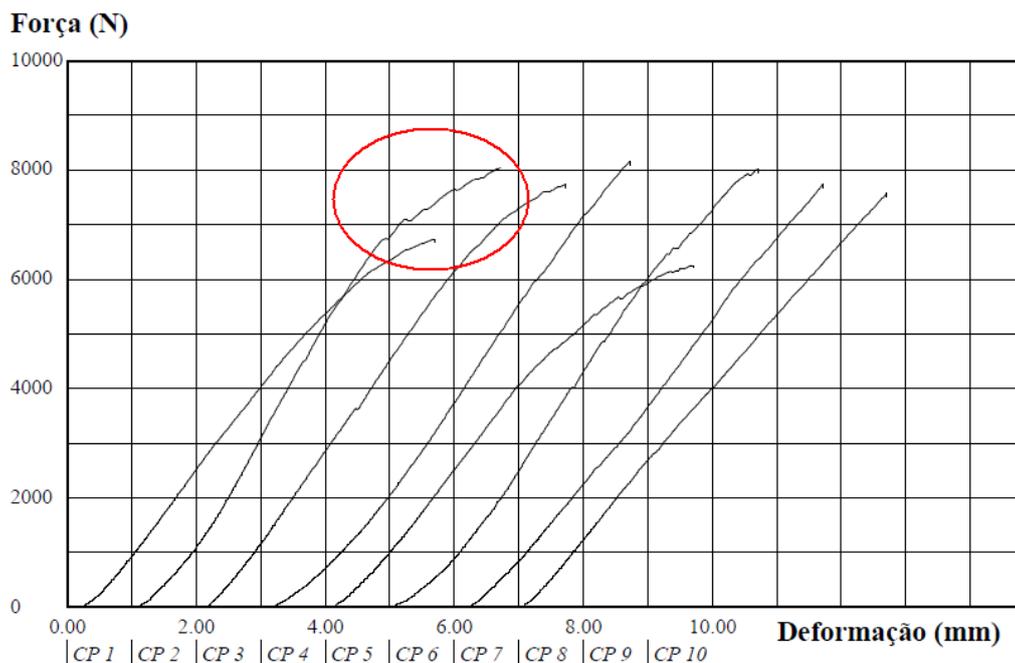


Figura 23 – Resultado do ensaio Janka para 10 corpos-de-prova da espécie *E. microcorys*

A Figura 23, extraída e adaptada do relatório de ensaios de dureza Janka, da máquina de laboratório (EMIC - DL 30000), apresenta o diagrama força-deformação dos ensaios de dureza realizados em 10 corpos-de-prova da espécie *Eucalyptus microcorys*. A área circundada indica o período final do ensaio do corpo-de-prova “CP 2”, onde pode ser observado um incremento anormal da relação força-deformação, caracterizando a ruptura do material ensaiado. Além disso, um formato serrilhado nesta mesma área do diagrama indica, provavelmente, pequenos e sucessivos rompimentos ocorridos durante a penetração do endentador. O mesmo efeito pode ser observado nos corpos-de-prova 1, 3, 4 e 5 do mesmo diagrama.

A correlação da dureza dinâmica HD com a dureza Janka em meia endentação ( $R^2 = 0,912$ ), foi maior do que a correlação realizada com a dureza Janka em endentação plena ( $R^2 = 0,873$ ). Uma explicação para esta ocorrência deve ser atribuída ao fato que, com endentação completa, alguns ensaios Janka são comprometidos com o rompimento precoce do material, fato não observado nos ensaios com meia endentação.

O Durômetro Portátil DPM3 foi desenvolvido com o objetivo principal de automatizar as leituras de endentação das primeiras gerações do equipamento, apresentadas por Colenci (2006) e Ballarin (2010). Segundo Colenci (2006), a falta de precisão na leitura do diâmetro da calota endentada - diâmetros pouco variáveis nas condições extremas dos materiais analisados, agravadas pelo acabamento rústico das

superfícies avaliadas e a diferença entre os dois diâmetros ortogonais da calota endentada, em razão da estrutura anatômica da madeira - foram as principais desvantagens observadas na primeira geração do equipamento.

Com o uso da instrumentação eletrônica, disponível no DPM3, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das regressões entre a dureza HD e dureza Janka foi de 0,873, ao passo que na primeira geração do equipamento, o mesmo coeficiente, obtido com a mesma condição de operação (massa de 1 kg e altura de 200 mm) foi de 0,789.

Meyer et al. (2011), com o uso de um equipamento não instrumentado com o mesmo princípio de operação que o DPM3, encontraram coeficiente de determinação de 0,926 nas regressões entre da dureza dinâmica e dureza Brinell. O alto índice de correlação encontrado pelos pesquisadores, mesmo com um equipamento não instrumentado deve ser explicado por dois fatores: as regressões foram realizadas com a dureza Brinell e não com a dureza Janka e os lotes avaliados permitiram uma grande abrangência de densidades ( $\rho$ ), variando no intervalo de  $230 \leq \rho \leq 980$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), o que favorece obtenção de índices de correlação de maior magnitude.

Considerando que o DPM3 foi testado em lotes de madeira com densidades no intervalo  $690 \leq \rho \leq 980$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), o coeficiente de determinação obtido pela regressão entre a dureza HD e dureza Janka, foi muito bom. Tendo em vista que a metodologia do DPM3 é semelhante à metodologia Brinell, espera-se que a correlação entre a dureza dinâmica HD e a primeira seja maior do que a correlação com a dureza Janka.

### **4.3 Ensaios de validação**

Os ensaios de validação foram realizados em cinco espécies de eucalipto (Tabela 3) provenientes de um lote distinto daquele utilizado nos ensaios de calibração (Tabela 2). De cada espécie foram extraídas seis vigas sendo realizados, para cada viga, dez ensaios de dureza Janka e dez ensaios de dureza dinâmica conforme metodologia apresentada na Figura 13.

O modelo linear utilizado para estimar a dureza Janka a partir da dureza HD, expresso por  $y = 1,89 x + 3,263$ , foi obtido nos ensaios de calibração e considera a dureza HD calculada a partir da Equação 3.

A estatística descritiva das medições de dureza HD, dureza Janka e dureza Janka estimada, apresentou coeficientes de variação muito próximos (Tabela 9), o que revela uma boa sensibilidade do estimador.

Os valores de dureza HD foram aproximadamente a metade dos valores de dureza Janka e os valores estimados para esta última indicaram uma tendência de superestimação para as durezas de níveis mais elevados. Este fato pode ser inferido inicialmente a partir dos valores máximos de 107,90 MPa e 129,09 MPa apresentados para as durezas Janka e Janka estimada, respectivamente.

Tabela 9 – Estatística descritiva da Dureza HD, Janka e Janka estimada

Estadística Descritiva	Dureza HD (MPa)	Dureza Janka (MPa)	Dureza Janka estimada (MPa)
Média	37,30	65,31	73,76
Desv. Padrão	11,27	18,73	21,31
Mínimo	7,25	12,00	16,97
Máximo	66,57	107,90	129,09
CV(%)	30,22	28,68	28,89
N	300	300	300

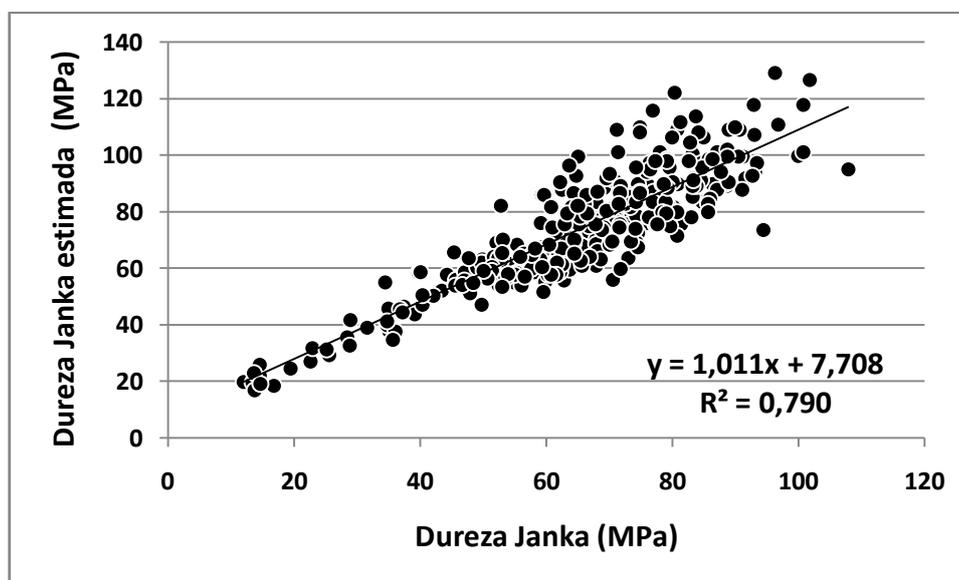


Figura 24 – Associação da dureza Janka medida em laboratório e a dureza Janka estimada a partir da dureza HD

A associação da dureza Janka com seu valor estimado (Figura 24) apresentou correlação de moderada para forte ( $R^2 = 0,790$ ) e tendência de dispersão para os valores das durezas de níveis maiores. Esta dispersão pode estar relacionada à característica não-linear entre a dureza dinâmica HD e profundidade de endentação como exemplificado na Figura 22.

O coeficiente linear do modelo ajustado na associação entre a dureza Janka e seu valor estimado (7,708) confirma uma pequena tendência de superestimação do estimador conforme referido anteriormente; já o coeficiente angular com valor próximo de 1 revela a efetividade do modelo.

#### **4.4 Dispersão dos valores de dureza na madeira**

A dispersão dos valores de dureza dos ensaios realizados no lote de validação e suas influências sobre os resultados das associações entre as durezas HD e Janka foi avaliada por meio do coeficiente de variação de dureza das vigas empregadas nos ensaios de validação, tendo em vista a possibilidade de existirem variações significativas dos valores de dureza para uma única peça arbitrária de madeira (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968) e a impossibilidade de repetição de um ensaio de dureza por endentação em um mesmo ponto do material. A soma destes fatores implica em limitações nas comparações dos valores de dureza HD e dureza Janka, pois as mesmas condições de ensaio não podem ser rigorosamente garantidas para as duas metodologias. Se a dispersão dos resultados de dureza de uma viga for nula, então o ponto para realização do ensaio de dureza poderia ser escolhido aleatoriamente; porém quanto maior a dispersão, mais próximos deveriam ser os pontos para realização dos ensaios de dureza com o objetivo de comparação das metodologias distintas.

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de variação (obtidos por viga e não por espécie) dos valores de dureza Janka das vigas empregadas nos ensaios de validação agrupados por espécie. Os valores, situados no intervalo de 4,62% a 24,53%, indicam uma considerável dispersão da dureza Janka nas vigas analisadas.

Tabela 10 – Coeficiente de variação de dureza Janka das vigas (ensaios de validação)

Espécie	Coeficiente de variação* (%)		
	Média	Mínimo	Máximo
<i>E. grandis</i>	12,17	5,26	24,53
<i>E. viminalis</i>	10,22	5,61	22,66
<i>E. saligna</i>	6,87	4,62	10,16
<i>E. tereticornis</i>	9,07	5,95	13,33
<i>E. citriodora</i>	8,70	6,11	11,23

\* Coeficientes de variação por viga e não por espécie

Para minimizar o efeito desta dispersão, todas as associações entre a dureza HD e a dureza Janka já reportadas neste trabalho foram realizadas entre pontos adjacentes como ilustrado na Figura 13.

Considerando-se a magnitude dos coeficientes de variação encontrados, uma nova associação foi realizada, desta vez somente entre os valores de dureza Janka da mesma viga. O objetivo desta associação foi verificar como a dispersão da dureza poderia influenciar o resultado da associação entre pontos adjacentes de dureza de uma mesma metodologia. Como apresentado na Figura 13, o valor de dureza Janka do primeiro ensaio realizado em cada viga, denominado Janka [1], foi associado com o segundo ensaio da mesma viga, denominado Janka [2], e assim sucessivamente, ou seja, uma associação entre a dureza Janka [n] e a dureza Janka [n+1], onde  $n$  representa o número do ponto do ensaio. Os pontos 5 e 6 não foram associados por não serem adjacentes.

O resultado confirmou o que racionalmente se esperava, ou seja, uma forte correlação ( $R^2 = 0,833$  – Figura 25) entre a dureza Janka de um ponto e seu adjacente. Os pontos que se distanciam da reta ( $y = x$ ) da Figura 25 não são, contudo, desprezíveis. Eles evidenciam casos de grande variação local da dureza numa mesma viga.

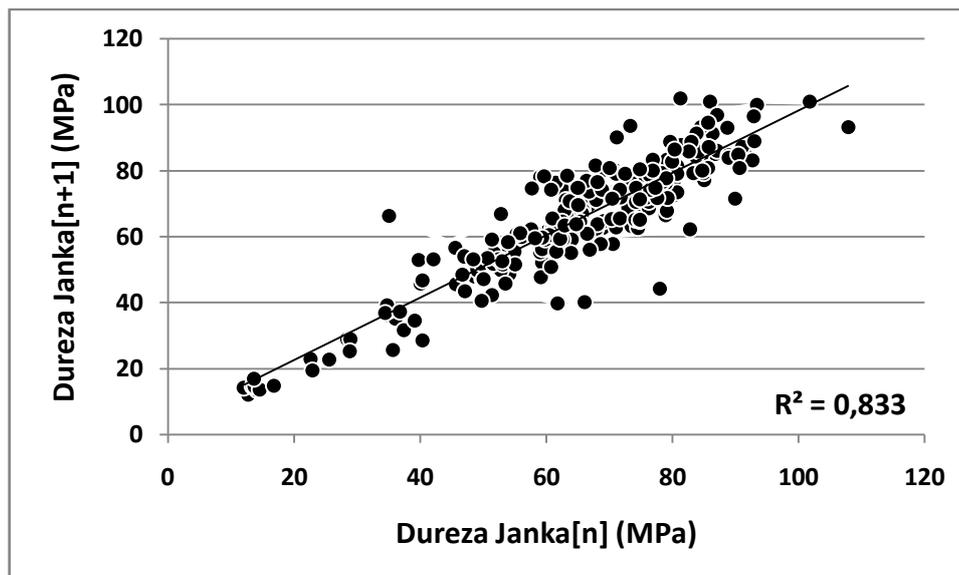


Figura 25 – Associação da dureza Janka [n] com a dureza Janka [n+1]

A correlação entre as durezas HD e Janka ( $R^2 = 0,873$  – Figura 16), indica que 87,3% da variação da variável dependente (dureza Janka) pode ser explicada pela variação da dureza HD; por sua vez, a correlação entre a dureza Janka [n] e Janka [n+1] ( $R^2 = 0,833$  – Figura 25) revela que 16,7% de sua desassociação deve estar relacionada com motivos externos à metodologia utilizada para avaliação da dureza. Considerando-se esta análise, é plausível afirmar que a parcela da dureza Janka que não pôde ser explicada pela dureza HD (Figura 16) incluiu fatores extrínsecos aos próprios métodos comparados.

Com objetivo de minimizar a influência da variação local da dureza na madeira sobre o resultado da associação das metodologias comparadas, foram realizadas duas novas associações, a primeira entre a média dos 10 pontos de dureza HD de cada viga com a média de seus respectivos pontos de dureza Janka e a segunda, entre a média de 3 pontos de dureza de ambas metodologias (pontos 1, 3 e 5 da Figura 13). A média de 10 pontos foi realizada em caráter investigativo; já a média de 3 pontos foi efetuada por seu valor prático e operacional. Para cada associação foram realizados ajustes por regressão linear e exponencial (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultados das associações das médias das durezas HD e Janka por viga

Associação	Tipo de ajuste	Modelo	R <sup>2</sup>
Durezas HD e Janka (valores médios de 10 medições)	Linear	$y = 1,650 x + 3,743$	0,910
	Exponencial	$y = 1,613 x^{1,022}$	0,951
Durezas HD e Janka (valores médios de 3 medições)	Linear	$y = 1,602 x + 6,388$	0,867
	Exponencial	$y = 1,774 x^{1,003}$	0,927

Em todos os ajustes realizados foram encontradas fortes correlações com coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) de até 0,951. As correlações encontradas para a segunda associação (média de 3 pontos) foram, evidentemente, menores que as da primeira e os modelos exponenciais resultaram em melhores ajustes em relação aos modelos lineares. Apesar disso, os valores dos expoentes foram próximos de 1, indicando tendência à regressão linear.

Com respaldo nas excelentes correlações apresentadas na Tabela 11, duas últimas associações foram realizadas com a mesma metodologia, porém, desta vez entre a dureza Janka e o seu valor estimado pelo modelo obtido nos ensaio de calibração ( $y = 1,89 x + 3,263$ ). Os resultados (Figuras 26 e 27) apresentaram coeficientes de determinação idênticos aos obtidos na associação direta entre as durezas HD e Janka, confirmando a validade do modelo e consequentemente a eficácia do durômetro portátil para estimativa da dureza Janka a partir da Dureza HD.

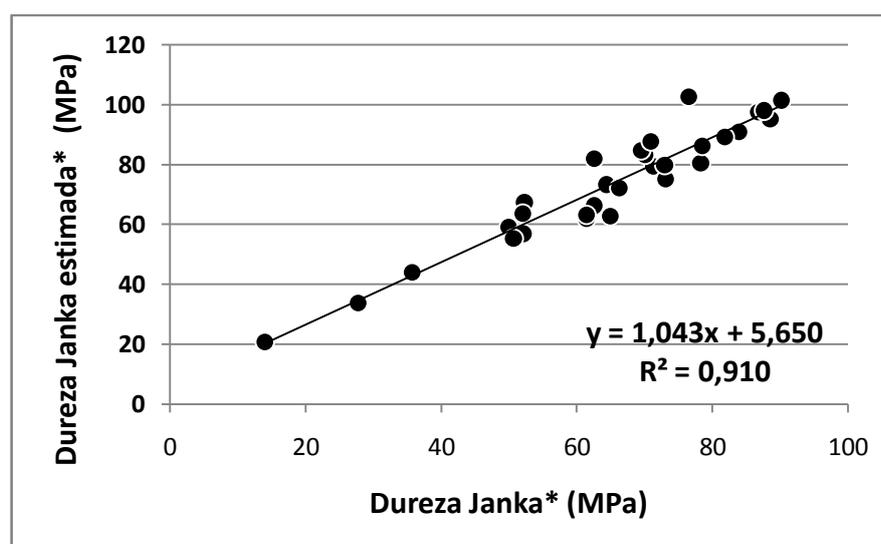


Figura 26 – Associação da dureza Janka com seu valor estimado a partir da dureza HD  
\*Média de 10 pontos por viga

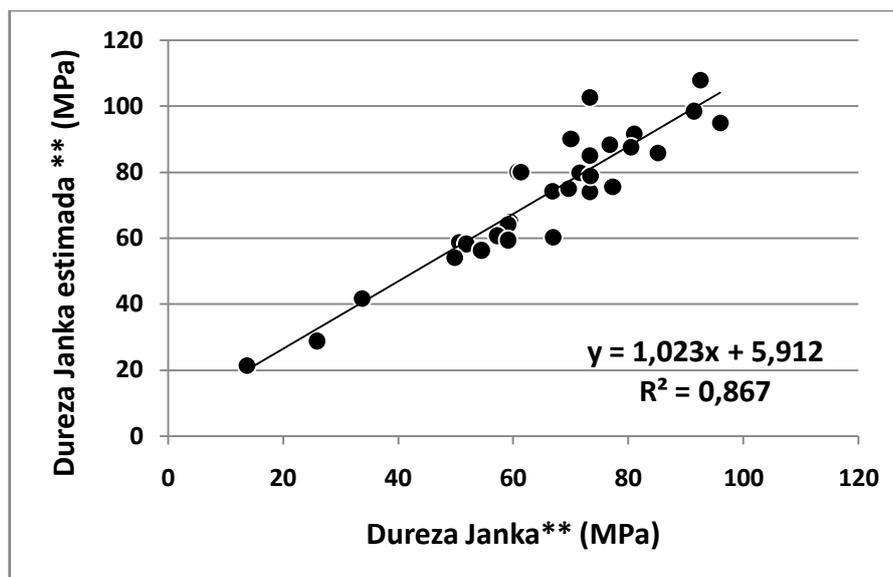


Figura 27 – Associação da dureza Janka com seu valor estimado a partir da dureza HD  
 \*\* Média de 3 pontos por viga

A correlação entre a dureza Janka [n] e a dureza Janka [n+1] ( $R^2 = 0,833$  – Figura 25) foi inferior à obtida entre a dureza Janka e a mesma estimada a partir das médias de dureza HD ( $R^2 = 0,867$  – Figura 27). Estes resultados abonam o emprego das médias, que tem efeito de filtro para eventuais *outliers* (valores atípicos ou inconsistentes).

#### 4.5 Importância do uso da dureza média para os ensaios por endentação

A dispersão da dureza na madeira é um desafio para qualquer metodologia de avaliação de dureza por endentação, tanto Janka, como Brinell e a própria dureza dinâmica HD. Tratam-se de ensaios localizados e, conseqüentemente, com amostragem limitada; para estes casos, o uso da dureza média é relevante por representar melhor o material ensaiado.

Os ensaios tradicionais por endentação, por serem estáticos, demandam considerável tempo para execução e não incentivam a medição da dureza em vários pontos para obtenção de um valor médio. A dureza Janka, por exemplo, é uma metodologia que despende em torno de 2 minutos para ser realizada, sem contar o tempo para posicionamento do corpo de prova no equipamento de ensaio.

A dureza dinâmica HD, obtida com o uso do DPM3, pode ser empreendida em apenas 5 segundos com um procedimento simples e facilmente aplicável em condições de campo.

O número de amostras é importante para o cálculo da dureza média, tanto pelo seu lado positivo, no sentido de amenizar a influência da dispersão da dureza no resultado final, quanto pelo seu lado negativo, relacionado ao esforço operacional envolvido nas repetições dos ensaios. O número ideal deve ser tal que permita uma representação razoável da dureza média sem, contudo, onerar o lado operacional.

A Figura 28 apresenta os coeficientes de determinação das associações realizadas entre a dureza Janka, obtida pela média de 10 ensaios de cada viga (valor de referência), com a mesma dureza obtida pela média de números distintos de ensaios. Como pode ser observado, as médias calculadas a partir de 4 pontos, melhoraram a correlação com o valor de referência em apenas 3,2% ( $R^2$  de 0,969 a 1,000), ao passo que a média calculada com apenas 3 pontos aumenta 8,5% da mesma correlação. Dentro do contexto analisado (lote de validação), entende-se que o número de 3 amostras já é suficiente para obtenção de um valor médio de dureza. Este valor pode ser obtido com o uso de DPM3 dependendo apenas 20 segundos.

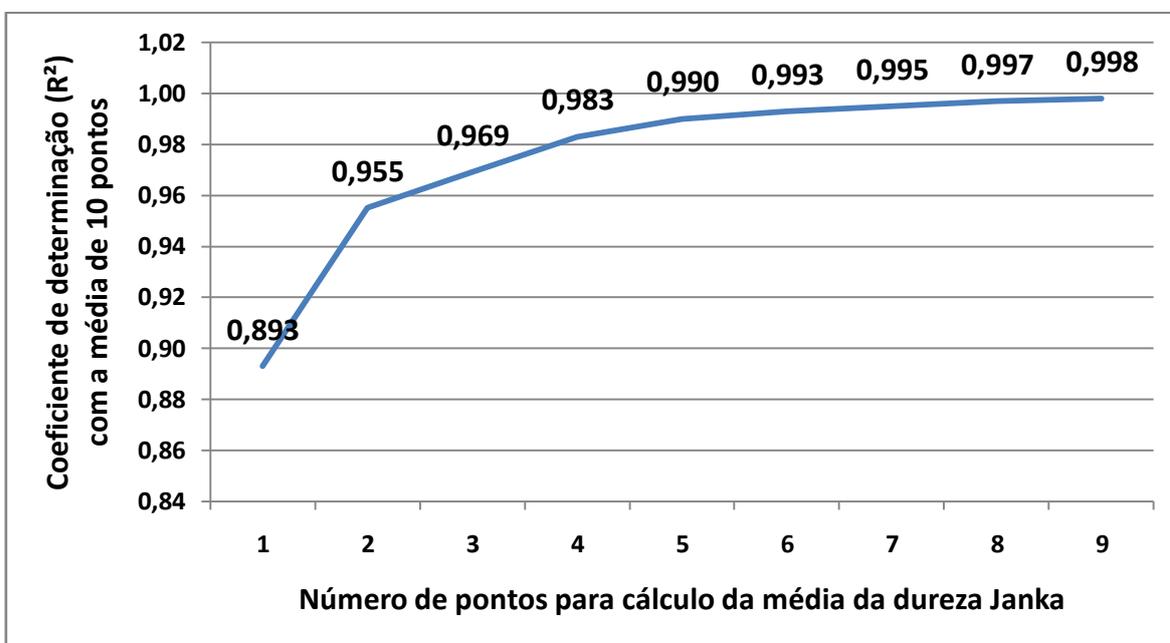


Figura 28 – Coeficientes de determinação para associações entre dureza Janka com média de 10 pontos e dureza Janka média com números distintos de pontos.

Por ser um procedimento expedito, o cálculo da dureza HD média foi convenientemente integrado no algoritmo do processador eletrônico do DPM3. Desta forma o bom desempenho das associações com os valores médios de dureza (Tabela 11 e Figuras 26, 27 e 28) foram outorgadas ao equipamento em condições operacionais.

#### 4.6 Validação do modelo para estimativa de tempo de endentação

O modelo obtido nos ensaios de calibração para estimar o tempo de endentação por meio de sua profundidade (Figura 21), foi avaliado no lote de madeiras dos ensaios de validação e confirmou a fortíssima correlação apresentada anteriormente ( $R^2 = 0,982$  – Figura 29). A resolução de amostragem temporal do processador eletrônico do DPM3 (0,05 ms), determinada por sua taxa de aquisição de dados (20 KHz), impôs o aparecimento de incrementos fixos no eixo das abscissas desta associação.

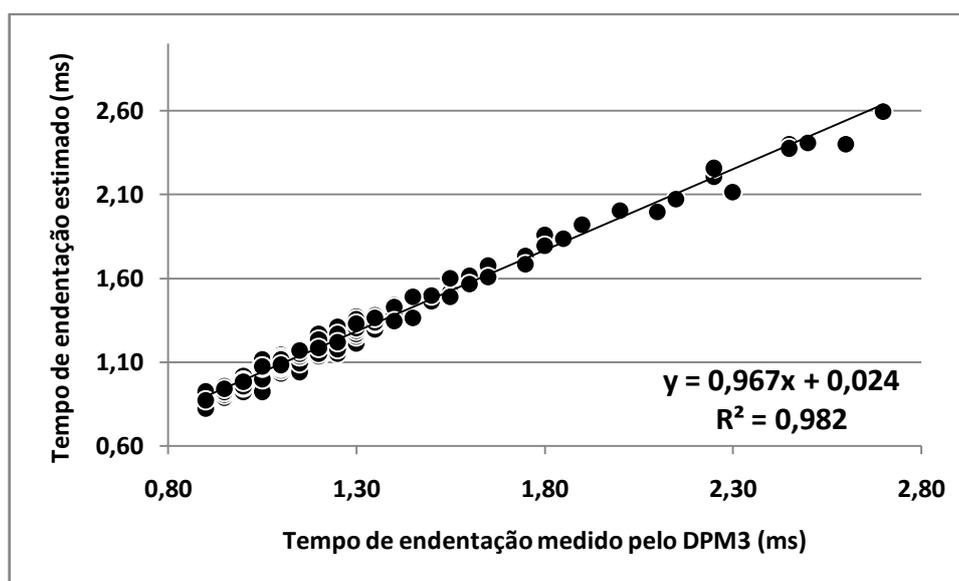


Figura 29 – Correlação entre o tempo de endentação medido pelo DPM3 e o tempo de endentação estimado pelo modelo  $y = 0,844x - 0,041$

A eficácia da estimativa do tempo de endentação é importante, pois permite a equipamentos desprovidos de instrumentação adequada para medição deste tempo, o cálculo da dureza dinâmica HD conforme apresentado na Equação 3. Evidentemente a precisão da medição da profundidade não pode ser garantida sem o uso de instrumentação adequada, porém, os métodos de avaliação visual da endentação, como

empregados por Heräjärvi (2004), Grekin e Verkasalo (2013), Colenci (2006), Meyer, (2011) e Ballarin et al. (2012), possibilitam uma aproximação razoável de sua profundidade, quer seja pela medição direta ou por seu cálculo a partir do diâmetro da calota endentada.

## 5. CONCLUSÕES

O durômetro portátil DPM3, desenvolvido a partir das versões anteriores do equipamento, agregou perfeitamente a automação das medições de dureza por meio de transdutor de deslocamento e processador eletrônico embarcado.

As medições de dureza foram realizadas automática e instantaneamente após a realização dos ensaios e os dados completos de todos os ensaios foram exportados e salvos para estudos futuros sobre o fenômeno da endentação dinâmica da madeira.

A partir do programa experimental realizado para teste do durômetro portátil DPM3, as conclusões adicionais foram estabelecidas:

- O equipamento promoveu leituras rápidas e confiáveis de endentação, bem como da dureza HD.
- Os problemas clássicos de recuperação da área endentada e “*sinking in*”, característicos do ensaio de dureza Brinell, foram resolvidos pelo equipamento, pois este realiza a medição da endentação sob carga e avalia diretamente a endentação e não indiretamente, por meio da área endentada após a remoção da carga.
- A equação proposta para cálculo da dureza dinâmica proveu um conceito físico satisfatório para expressar a grandeza, pois levou em consideração a força média resultante do impulso promovido pelo fenômeno da endentação, que é diferente para valores distintos de dureza.

- O tempo de endentação pode ser precisamente estimado com base na profundidade de endentação, pela expressão  $y = 0,844x - 0,041$ , onde  $x$  é a variável medida em milímetro e  $y$  a variável estimada em milissegundo ( $R^2 = 0,982$ ).
- A dureza dinâmica HD, medida pelo equipamento, revelou correlação moderada para forte com o ensaio convencional de dureza Janka ( $R^2 = 0,873$ ) e forte correlação com a dureza Janka medida em meia endentação ( $R^2 = 0,912$ ). Esta diferença foi atribuída ao fato de que, com endentação completa, alguns ensaios de dureza Janka foram comprometidos com o rompimento precoce do material, fato não observado nos ensaios com meia endentação.
- A dureza Janka foi estimada satisfatoriamente a partir da dureza dinâmica HD confirmando a eficácia do equipamento e de sua metodologia para avaliação da dureza da madeira ( $R^2 = 0,790$ ).
- A dureza Janka estimada a partir da média da dureza HD apresentou forte correlação com a dureza Janka média ( $R^2 = 0,910$  – ajuste linear e  $R^2 = 0,951$  – ajuste exponencial).
- O nível de desassociação apresentado na correlação entre a dureza Janka e o seu próprio valor medido em ponto adjacente do material (16,7% –  $R^2 = 0,833$ ), comprovou a influência da dispersão da dureza da madeira nas análises de correlação dos ensaios realizados. A dispersão da dureza Janka nas vigas utilizadas nos ensaios de validação esteve situada no intervalo de 4,62% a 24,53% (Tabela 10).
- Todas as associações realizadas com a dureza dinâmica HD revelaram uma pequena tendência a dispersão de dados para as durezas de níveis elevados. Este fato foi atribuído inicialmente à característica não-linear entre dureza dinâmica HD e profundidade de endentação, determinada pelo formato esférico do endentador. Esta explicação carece de comprovação laboratorial e sugere o uso de endentador com geometria ou dimensões diferentes.

Este trabalho teve foco no desenvolvimento da versão automatizada do durômetro portátil para madeiras e em análises iniciais da dureza dinâmica na madeira. Estudos posteriores devem ser empreendidos para um melhor entendimento desta dureza e do próprio fenômeno da endentação dinâmica na madeira e suas relações com outras propriedades do material, como densidade, umidade, temperatura, estrutura anatômica, rigidez e outras resistências.

## 6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM A370-77**: Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 58, 1977.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM D1037-78**: Hardness Modulus Test - Number of Penetrations, 234, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.

AUGUTIS, S. V. et al. The hardness testing by means of indentation for low density materials. **Matavimai = Measurements/Kauno Technologijos Universitetas**. p. 1292-1323, 2005.

BALLARIN, A.W. et al. Portable hardness tester for timber classification. In: WCTE 2010 – World Conference on Timber Engineering, 2010, Riva Del Garda - Itália. **Proceedings (CD-ROM)...**2010. p.1-8.

BALLARIN, A.W. et al. Estimating hardness of eucalyptus wood with a portable hardness tester. In: WCTE 2012 – World Conference on Timber Engineering, 2012, Auckland, Nova Zelândia. **Proceedings (CD-ROM)...** 2012. p.1-4.

BARBATO, G.; DESOGUS, S. Problems in the measurement of Vickers and Brinell indentations. **Measurement**, v. 4, n. 4, p. 137-147, 1986.

BARBOSA, G. F. **Análise de metodologias de microdureza aplicadas a compósitos: é possível comparar resultados utilizando-se diferentes protocolos?** 2010. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

BEKTAS, I., ALMA, M. H. Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech (*Fagus orientalis* LIPSKY). **Forest Products Journal**, v. 51, n. 11-12, p.84-87, 2001.

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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

COLENCI, R. A. **Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário**. 2006, 101 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

DOYLE, J. The hardness of wood. Ph.D.- Thesis, University of Canterbury, Christchurch, N.Z. 1980.

DOYLE, J.; WALKER, J. C. F. Indentation hardness of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 17, n. 3, p. 369-376, 1985.

DOYLE, J.; WALKER, J. C. F. Indentation of wood by wedges. **Wood science and technology**, v. 19, n. 1, p. 47-55, 1985.

DUBOVSKÝ, J.; ROHANOVA, A. et al. Static and dynamic hardness of chosen wood species. In: **Proceedings of the 2nd International Scientific Conference Woodworking Technique, Zalesina, Croatia, 11-15 September, 2007**. Faculty of Forestry, University of Zagreb, p. 27-32, 2007.

DUMAIL et al. Hardness and basic density variation in the juvenile wood of maritime pine. In: \_\_\_\_\_ **Annales des sciences forestières**. EDP Sciences, p. 911-923, 1998.

ELLIS, G. Encoders and Resolvers. In: \_\_\_\_\_. **Control system design guide**. 4.ed. Butterworth-Heinemann, cap.4, p. 285–310, 2012.

EN, P. N. 1534. Wood and parquet flooring. Determination of resistance to indentation (Brinell). **Test method**. European Standard CEN, 10 p. 2000.

GREKIN, M.; VERKASALO, E. 2013. Variations in and Models for Brinell Hardness of Scots Pine Wood from Finland and Sweden. **Baltic Forestry**, v. 19, p. 128-136, 2013.

HANSSON, L.; ANTTI, A. L. The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 3, p. 467-470, 2006.

HAO, L. et al. Modernization innovation on MCU education. In: \_\_\_\_\_ Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010. **3rd IEEE International Conference on IEEE**, p. 543-546, 2010.

HELIŃSKA-RACZKOWSKA, L.; MOLIŃSKI, W. The effect of the Janka ball indentation depth on the hardness number determined for selected species. **Folia Forestalia Polonica**, v.34, p. 27-36, 2003.

HERÄJÄRVI, Henrik. Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems. **Wood and fiber science**, v. 36, n. 2, p. 216-227, 2004.

HIRATA, S. et al. Hardness distribution on wood surface. **Journal of Wood Science**, v. 47, n. 1, p. 1-7, 2001.

HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinussylvestris* L.). **HolzalsRoh- und Werkstoff**, v. 58, n. 1-2, p.91-95, 2000.

HUDDLESTON, C. **Intelligent sensor design using the microchip dsPIC**. Newnes, 2006.

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.

IBACH, R. E. Specialty treatments. In: Wood handbook - Wood as an engineering material. Centennial Edition. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, cap. 19, p.1-16, 2010.

KADHIM A. H. et al. Measurement of steady-state and transient load-angle, angular velocity, and acceleration using an optical encoder. **Instrumenttion and Measurement, IEEE Transactions on**. v. 41, n. 4, p. 486-489, 1992.

KOLLMANN, F. FP; CÔTÉ JR, W. A. Principles of wood science and technology. vol.1. Solid Wood. In: \_\_\_\_\_ **Principles of Wood Science and Technology. Vol. I. Solid Wood**.Springer-Verlag, 1968.

KONTINEN, P.; NYMAN, C. Hardness of wood-based panel products and their coatings and overlays. **Paperi ja Puu-Paper and Timber**, v. 59, n. 9, p. 531-&, 1977.

KÚDELA, J. Analysis of Wood hardness. In: \_\_\_\_\_ **Wood structure and properties '98**. Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, p.199-203, 1998.

LIU, J.; WANG, Y. Development and use of an MCU experimental development board. In: Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012. **2nd International Conference on**. IEEE, p. 2541-2543, 2012.

LEWIS W. C. **Hardness modulus as an alternative measure of hardness to the standard Janka ball for wood and wood-base materials**. Forest Products Lab Madison WIS, 1968.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers. **Datasheet**, 398 p. 2008.

MERRY R. J. et al. Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders. **Mechatronics**, v.20, n.1, p. 20-26, 2010.

MERRY, R. J. et al. Optimal higher-order encoder time-stamping. **Mechatronics**, 2013.

MEYER, L. et al. Dynamic and static hardness of wood: method development and comparative studies. **International Wood Products Journal**, v. 2, n. 1, p. 5-11, 2011.

MIYASHITA, K. et al. Features of a magnetic rotary encoder. **Magnetics, IEEE Transactions on**. v. 23, n.5, p. 2182-2184, 1987.

MITRA, S. When MCUs and DSPs Collide: Digital Signal Controllers. Digital Signal Controller Division, Microchip Technology Inc. DSP-FPGA. **Product Resource Guide**, 2005.

NEGREA, A. Control of induction motors using an incremental encoder as position transducer. **Journal of Computer Science and Control Systems**. v. 6, n. 1, p.67, 2013.

NIEMZ, P.; STÜBI, T. Investigations of hardness measurements on wood based materials using a new universal measurement system. In: \_\_\_\_\_ **Proceedings of the symposium on wood machining, properties of wood and wood composites related to wood machining**. Vienna, p. 51-61, 2000.

OLIVEIRA, A. M. Encoder. Cuiabá: Instituto Federal de Educação Tecnológica do Mato Grosso- IFMT, 30 p., 2007.

PINTAUDE, G.; HOECHELE, A. R. Experimental analysis of indentation morphologies after spherical indentation. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 56-60, 2014.

RANIEL, T. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de posição e velocidade de uma esteira transportadora usando inversor de frequência e microcontrolador**. Ilha Solteira, UNESP, 2011, 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2011.

SEHLSTEDT-PERSSON, S. M. B. High-temperature drying of Scots pine. A comparison between HT-and LT-drying. **HolzalsRoh-und Werkstoff**, v. 53, n. 2, p. 95-99, 1995.

SHI, Y. et al. Design of output voltage waveform on magnetic encoder. **Journal of magnetism and magnetic materials**. v. 282, p. 317-320, 2004.

SOARES-FERREIRA, S. K. **Aptidão do sobreiro como produtor de matéria-prima para a indústria de madeira e de painéis compósitos com vista a produtos de qualidade**. 2011. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2011.

SONMEZ, F. O.; DEMIR, A. Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts. **Journal of materials processing technology**, v. 186, n. 1, p. 163-173, 2007.

SWACZYNA, I. et al. Hardness and wear resistance tests of the wood species most frequently used in flooring panels. **Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Forestry and Wood Technology**, n. 76, 2011.

TABOR, D. **The hardness of metals**. Clarendon P, 1951.

TODARO, L. Effect of steaming treatment on resistance to footprints in Turkey oak wood for flooring. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p. 209-214, 2012.

YEH, W. H. et al. High resolution optical shaft encoder for motor speed control based on an optical disk pick-up. **Review of Scientific Instruments**. v.69, n. 8, p. 3068-3071, 1998.

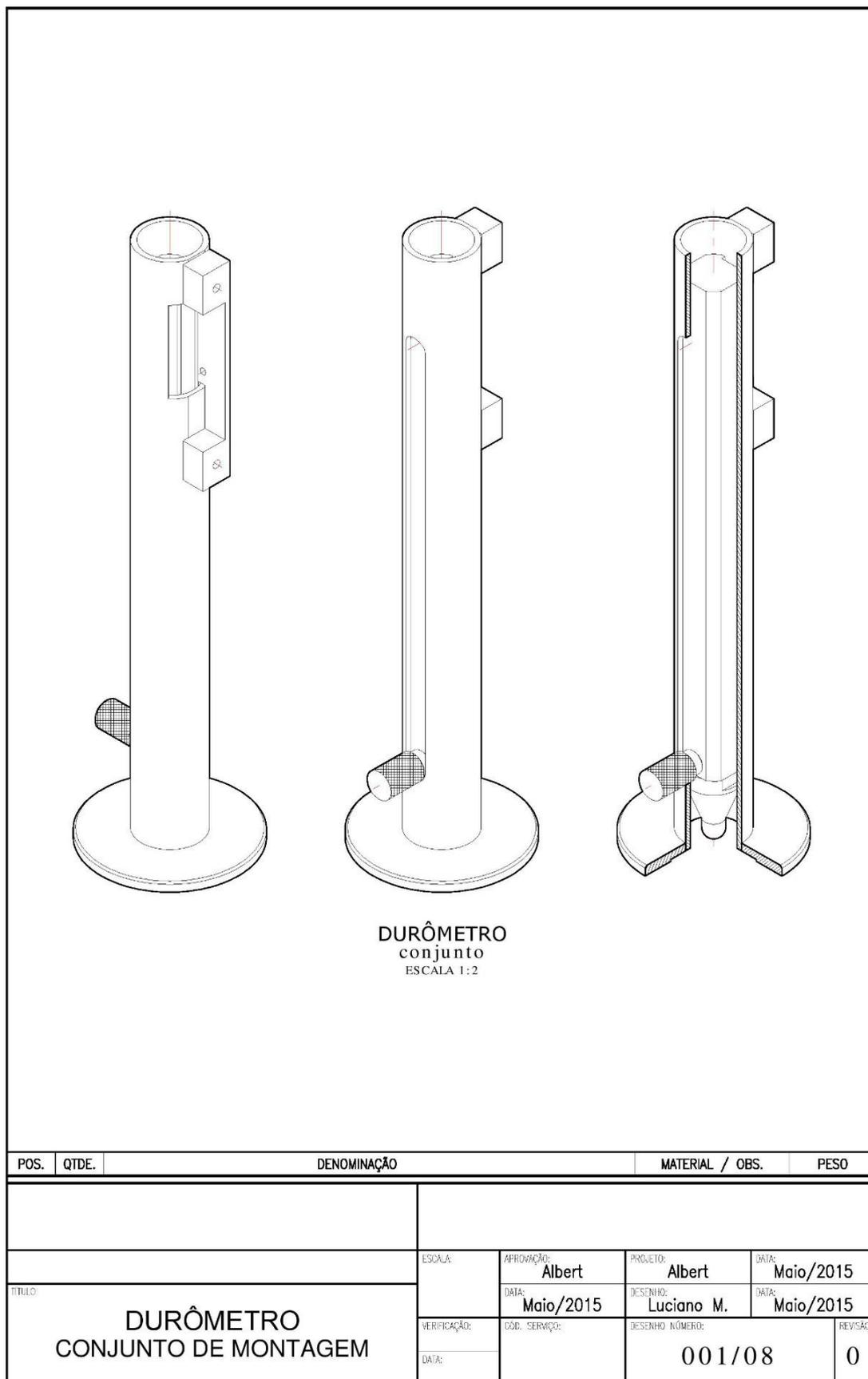
YU, S.D. ZHANG, X. A data processing method for determining instantaneous angular speed and acceleration of crankshaft in an aircraft engine-propeller system using a magnetic encoder. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v.24, n. 4, p. 1032-1048, 2010.

WALLEY, S. M. Historical origins of indentation hardness testing. **Materials Science and Technology**, v. 28, n. 9-10, p. 9-10, 2012.

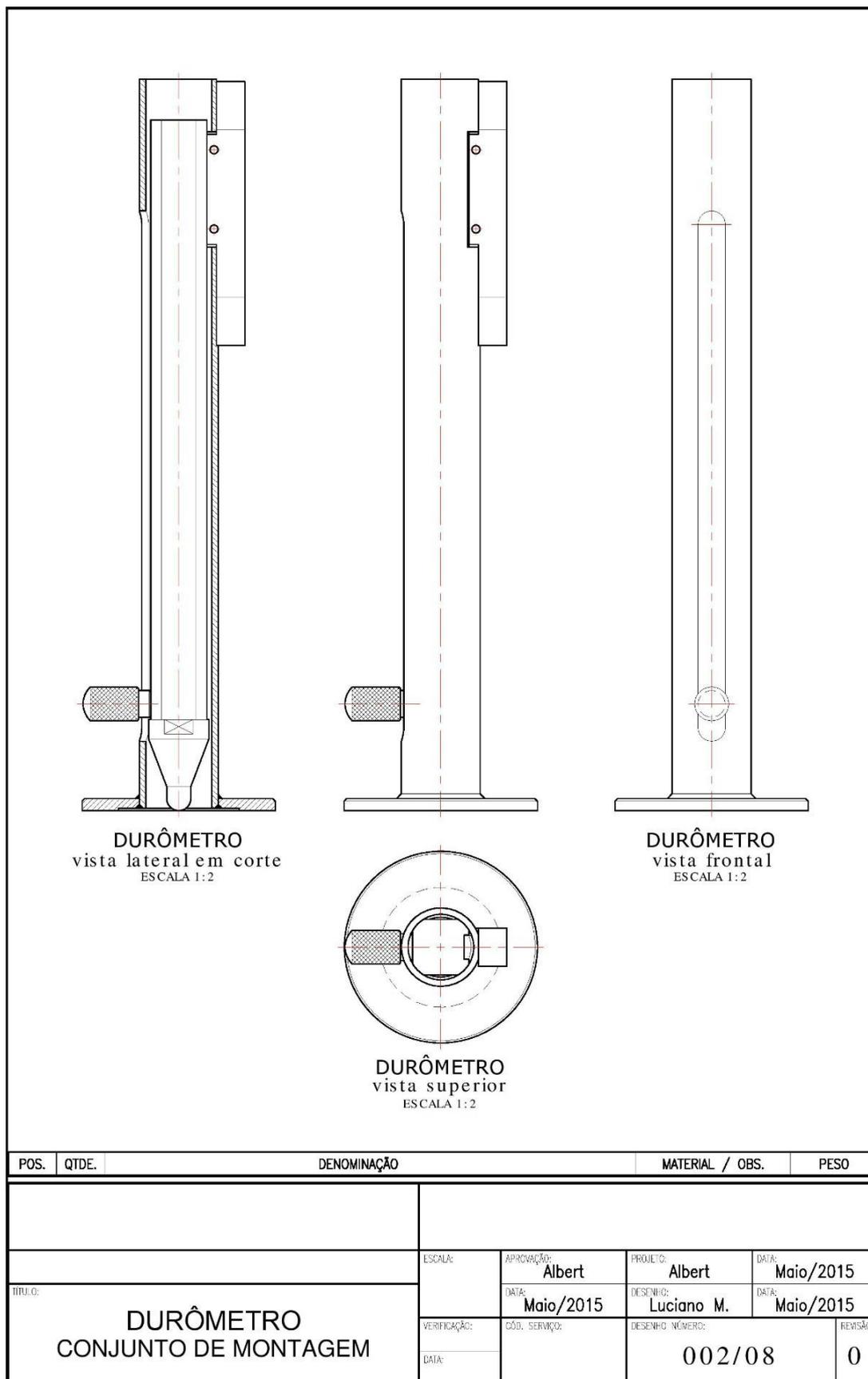
WOOD, L. W. Relation of strength of wood to duration of load.1960.

## **APÊNDICE 1**

Detalhes construtivos do DPM3



**Figura I-1: Conjunto de montagem em corte**



**Figura I-2: Vistas do conjunto de montagem**

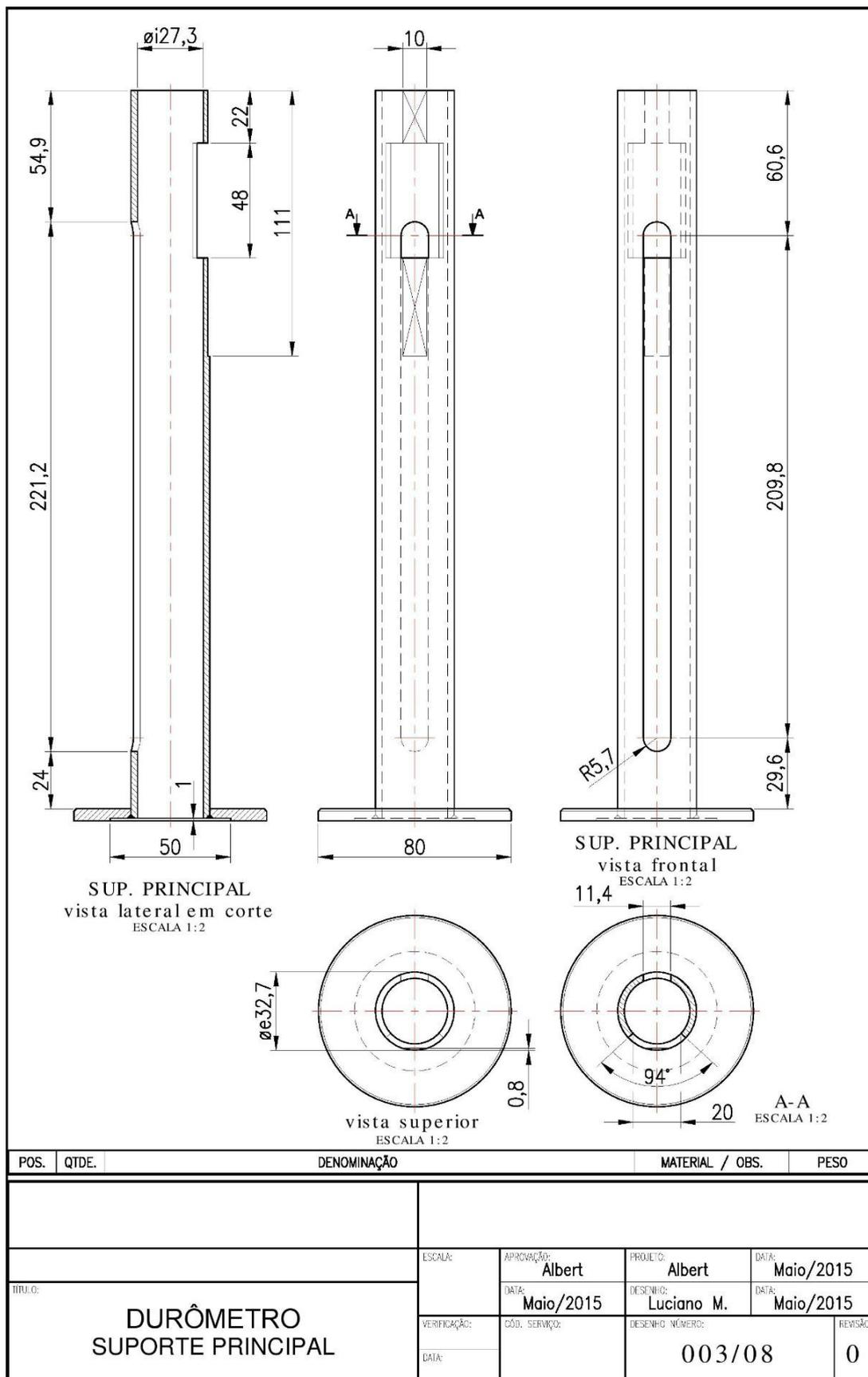
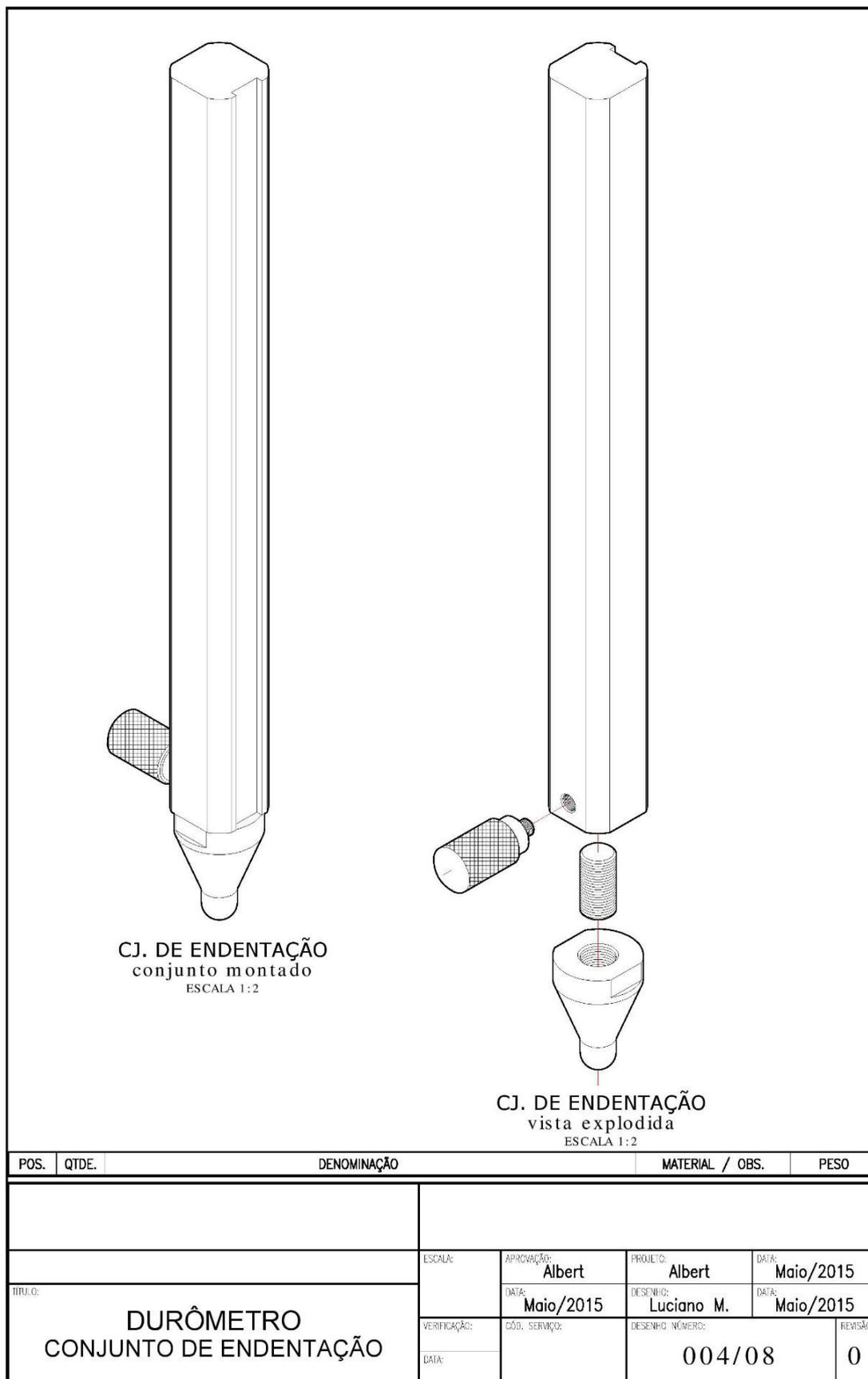
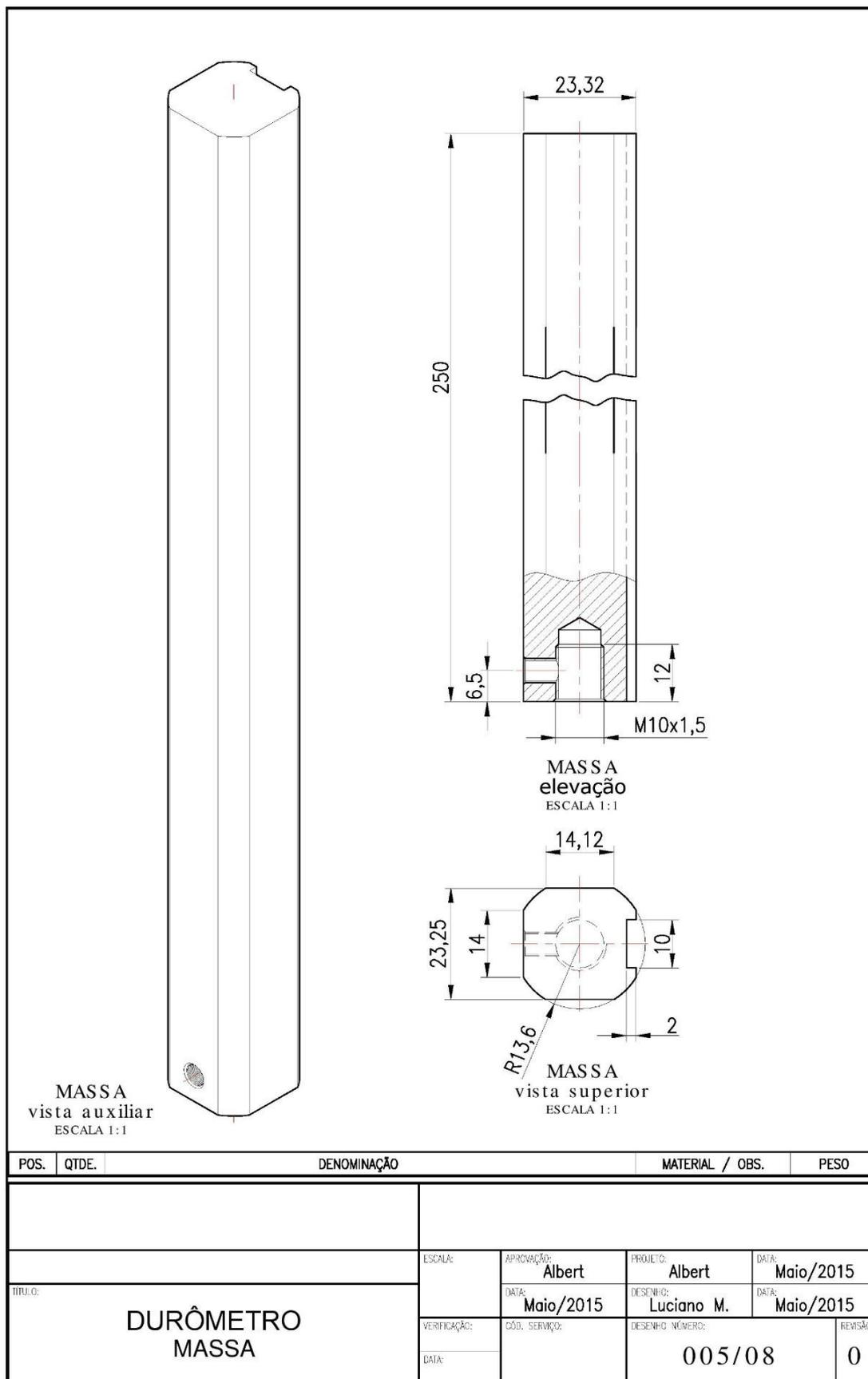


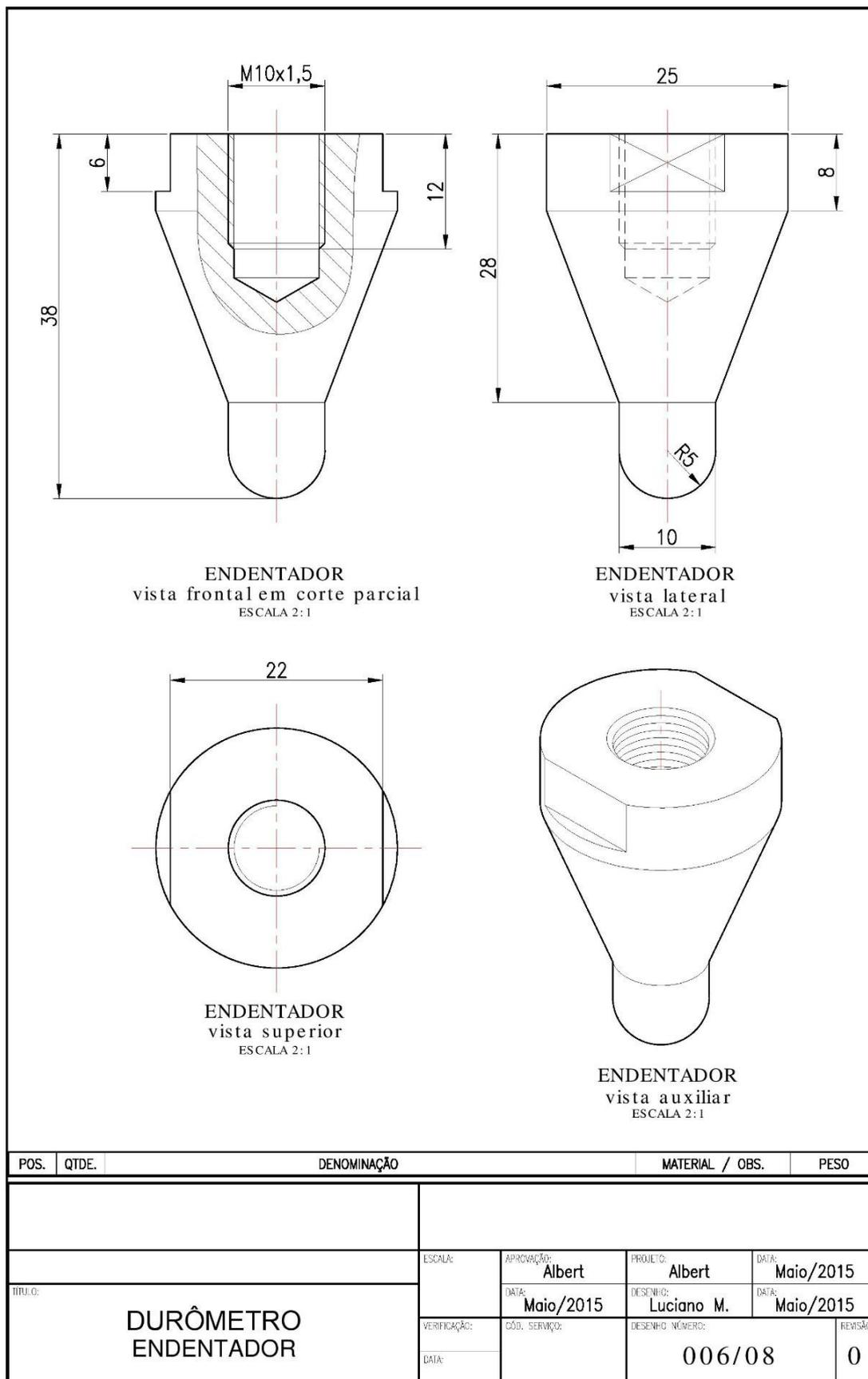
Figura I-3: Vistas do suporte principal



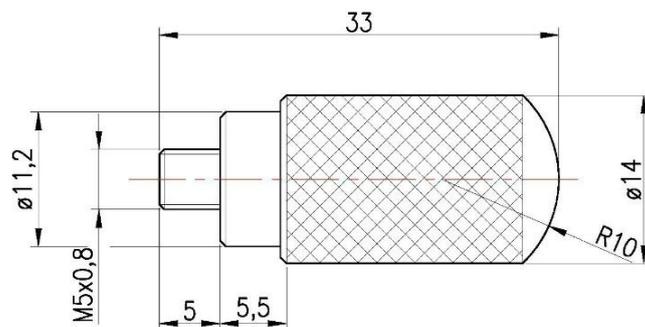
**Figura I-4: Conjunto de endentação**



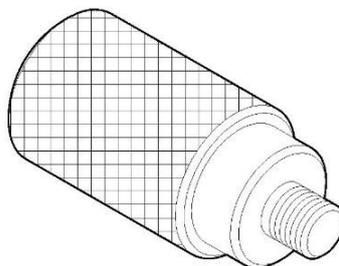
**Figura I-5: Massa**



**Figura I-6: Endentador**



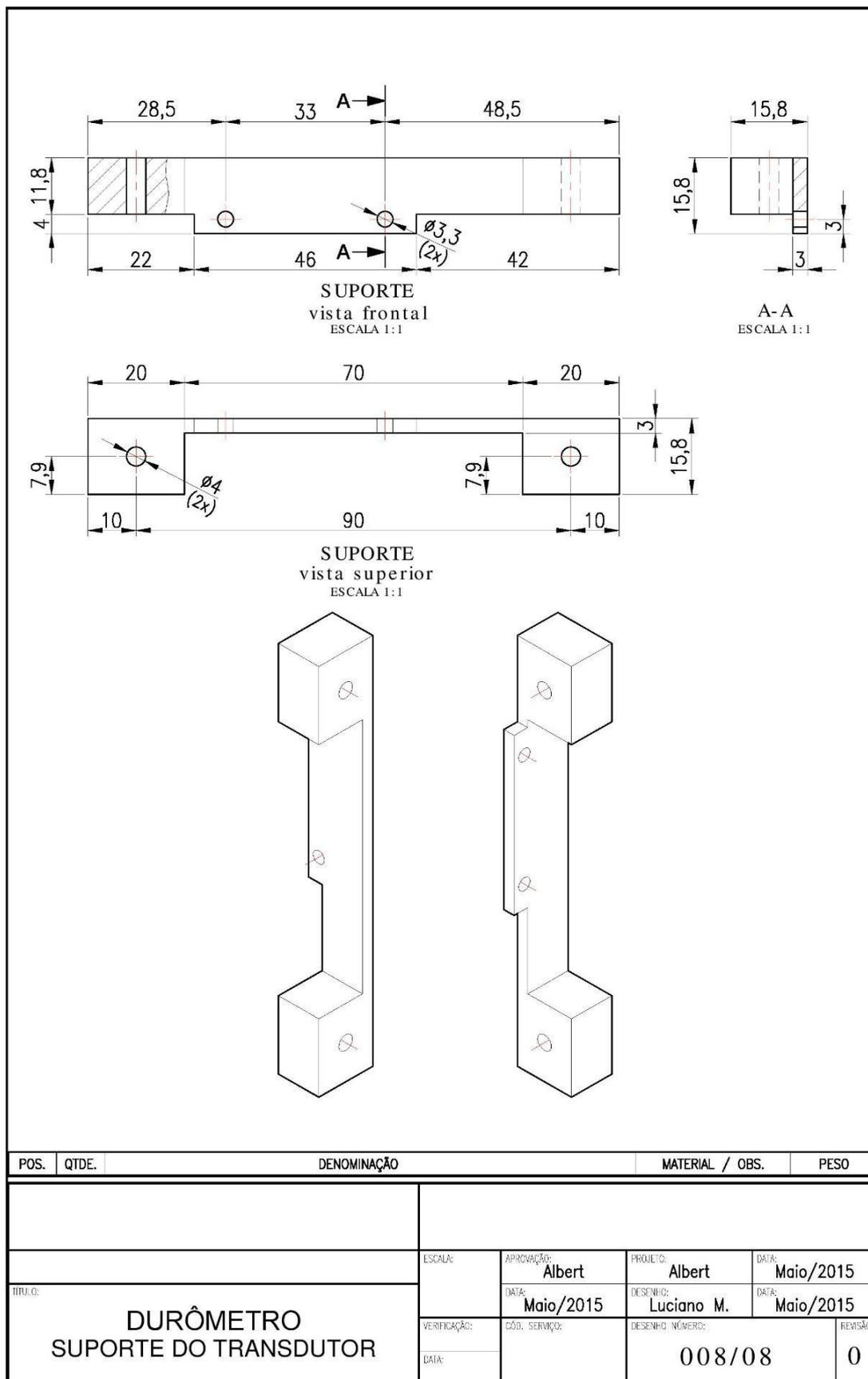
MANÍPULO  
ESCALA 2:1



MANÍPULO  
vista auxiliar  
ESCALA 2:1

POS.	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL / OBS.	PESO
TÍTULO: <b>DURÔMETRO MANÍPULO</b>	ESCALA:	APROVAÇÃO: <b>Albert</b>	PROJETO: <b>Albert</b>	DATA: <b>Maió/2015</b>
		DATA: <b>Maió/2015</b>	DESENHO: <b>Luciano M.</b>	DATA: <b>Maió/2015</b>
	VERIFICAÇÃO:	CÓD. SERVIÇO:	DESENHO NÚMERO: <b>007/08</b>	REVISÃO: <b>0</b>
	DATA:			

**Figura I-7: Manípulo**



**Figura I-8: Suporte do transdutor**

## **APÊNDICE 2**

Dados completos dos ensaios de Calibração do Durômetro Portátil para Madeiras – DPM3

Espécie	CP	Endentação máxima (mm)	Tempo endentação [s]	Dureza Dinâmica HD (MPa)	Dureza Dinâmica HD* (kJ.m <sup>-2</sup> )	Dureza Janka (MPa)	Dureza Janka 2,82 mm (MPa)
E. maculata	1-4	1,53	1,25	31,96	40,78	51,70	33,66
	1-5	1,64	1,40	26,62	38,04	44,50	27,47
	1-6	1,41	1,10	39,40	44,25	68,40	50,52
	1-8	1,49	1,25	32,81	41,87	57,30	39,43
	1-9	1,54	1,25	31,75	40,51	56,00	38,30
	1-10	1,52	1,25	32,17	41,05	54,50	39,36
	1-11	2,02	1,70	17,80	30,89	34,20	19,91
	1-12	1,61	1,25	30,37	38,75	62,10	43,32
	1A-2	1,47	1,20	34,65	42,44	62,20	42,21
	1A-3	1,58	1,30	29,75	39,49	56,70	43,85
	1A-4	1,78	1,45	23,68	35,05	55,70	34,73
	1A-7	1,57	1,30	29,94	39,74	50,20	35,43
	1A-8	1,56	1,30	30,14	39,99	66,20	38,82
	1A-9	1,57	1,25	31,14	39,74	54,10	41,46
1A-10	2,36	1,80	14,39	26,44	42,20	19,71	
1A-11	1,46	1,20	34,88	42,73	58,00	40,02	
E. microcorys	2-1	1,31	1,05	44,43	47,62	67,20	47,52
	2-2	1,33	1,10	41,77	46,91	80,10	60,37
	2-4	1,43	1,15	37,16	43,63	77,00	52,58
	2-6	1,53	1,25	31,96	40,78	80,60	41,45
	2-7	1,49	1,20	34,18	41,87	62,40	47,61
	2-9	1,29	1,05	45,12	48,36	79,60	49,75
	2-11	1,38	1,15	38,51	45,21	79,30	42,52
	2-12	1,32	1,05	44,09	47,26	74,90	48,81
	2A-1	1,46	1,15	36,40	42,73	82,90	51,07
	2A-4	1,25	1,00	48,89	49,91	79,50	59,79
	2A-5	1,35	1,05	43,11	46,21	75,70	52,51
	2A-7	1,48	1,20	34,41	42,15	70,60	44,97
	2A-8	1,39	1,15	38,23	44,88	72,30	45,17
	2A-9	1,44	1,20	35,37	43,33	74,50	42,65
2A-10	1,45	1,15	36,65	43,03	67,60	46,23	
2A-12	1,30	1,05	44,77	47,99	81,90	62,53	
E. tereticornis	3-3	1,40	1,20	36,38	44,56	86,40	43,53
	3-4	1,36	1,10	40,85	45,87	91,10	56,51
	3-5	1,24	1,00	49,29	50,31	98,30	62,66
	3-6	1,30	1,00	47,01	47,99	104,20	57,59
	3-7	1,29	1,05	45,12	48,36	102,10	66,16
	3-9	1,35	1,10	41,16	46,21	96,80	58,02
	3-10	1,36	1,05	42,80	45,87	92,60	51,07
	3-11	1,31	1,05	44,43	47,62	102,50	59,25
	3A-1	1,27	1,00	48,12	49,12	103,90	62,37
	3A-3	1,26	1,00	48,50	49,51	116,70	69,54
	3A-4	1,44	1,20	35,37	43,33	82,10	50,09
	3A-5	1,43	1,15	37,16	43,63	102,30	57,57
	3A-6	1,18	1,00	51,79	52,87	101,10	70,91
	3A-7	1,17	0,95	54,98	53,32	130,30	78,89
3A-9	1,30	1,05	44,77	47,99	92,00	55,70	
3A-11	1,11	0,95	57,96	56,21	117,90	72,83	

Espécie	CP	Endentação máxima (mm)	Tempo endentação [s]	Dureza Dinâmica HD (MPa)	Dureza Dinâmica HD* (kJ.m <sup>-2</sup> )	Dureza Janka (MPa)	Dureza Janka 2,82 mm (MPa)
E. citriodora	4-3	1,34	1,10	41,46	46,56	78,70	56,47
	4-6	1,24	1,05	46,94	50,31	97,10	72,49
	4-7	1,34	1,10	41,46	46,56	85,00	61,62
	4-8	1,22	1,00	50,09	51,14	93,80	67,29
	4-9	1,28	1,05	45,47	48,74	85,30	59,22
	4-10	1,28	1,00	47,75	48,74	88,10	62,52
	4-11	1,18	0,95	54,52	52,87	92,70	70,41
	4-12	1,44	1,15	36,91	43,33	78,70	49,23
	4A-1	1,26	1,05	46,19	49,51	78,30	54,79
	4A-5	1,18	1,00	51,79	52,87	80,90	59,27
	4A-6	1,26	1,05	46,19	49,51	78,00	50,63
	4A-8	1,27	1,05	45,83	49,12	91,90	65,16
	4A-9	1,21	1,00	50,51	51,56	93,20	67,42
	4A-10	1,20	1,00	50,93	51,99	87,10	58,25
4A-11	1,27	1,00	48,12	49,12	85,20	57,35	
4A-12	1,19	0,95	54,06	52,43	79,70	55,56	
E. saligna	5-1	1,66	1,40	26,30	37,58	50,90	31,74
	5-4	1,32	1,05	44,09	47,26	96,10	60,76
	5-5	1,60	1,30	29,38	38,99	65,40	41,39
	5-6	1,42	1,20	35,87	43,94	75,60	48,01
	5-9	1,17	0,95	54,98	53,32	101,40	66,01
	5-10	1,40	1,15	37,96	44,56	69,80	42,90
	5-11	1,63	1,35	27,77	38,28	61,40	36,60
	5-12	1,27	1,00	48,12	49,12	95,70	66,98
	5A-1	1,54	1,25	31,75	40,51	71,30	47,20
	5A-2	1,13	0,95	56,93	55,21	135,40	77,32
	5A-6	1,54	1,30	30,53	40,51	65,50	43,66
	5A-8	1,29	1,00	47,38	48,36	94,10	60,54
	5A-9	1,57	1,25	31,14	39,74	65,30	43,17
	5A-10	1,44	1,10	38,58	43,33	88,80	58,69
5A-11	1,39	1,20	36,64	44,88	69,80	44,06	
5A-12	1,66	1,35	27,27	37,58	65,00	40,31	
E. dunni	6-1	2,05	1,70	17,54	30,43	35,30	22,33
	6-3	1,73	1,40	25,23	36,06	62,10	36,44
	6-4	1,73	1,40	25,23	36,06	53,90	33,25
	6-5	1,69	1,40	25,83	36,92	52,50	28,34
	6-7	1,52	1,25	32,17	41,05	55,50	34,43
	6-9	1,73	1,40	25,23	36,06	53,20	31,28
	6-11	1,80	1,50	22,64	34,66	52,20	30,45
	6-12	1,64	1,30	28,67	38,04	60,10	34,76
	6A-1	1,83	1,50	22,26	34,09	43,90	27,29
	6A-2	1,87	1,50	21,79	33,36	40,70	25,74
	6A-4	1,64	1,40	26,62	38,04	43,90	30,58
	6A-6	1,96	1,65	18,90	31,83	36,00	23,51
	6A-7	2,00	1,65	18,52	31,19	40,20	25,29
	6A-10	1,90	1,55	20,75	32,84	34,90	23,75
6A-11	1,62	1,30	29,02	38,51	54,70	34,67	
6A-12	2,03	1,65	18,25	30,73	39,80	23,39	

<b>Espécie</b>	<b>CP</b>	<b>Endentação máxima (mm)</b>	<b>Tempo endentação [s]</b>	<b>Dureza Dinâmica HD (MPa)</b>	<b>Dureza Dinâmica HD* (kJ.m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Dureza Janka (MPa)</b>	<b>Dureza Janka 2,82 mm (MPa)</b>
<i>E. viminalis</i>	7-2	1,90	1,60	20,10	32,84	31,20	21,84
	7-3	2,09	1,70	17,20	29,85	41,70	24,75
	7-5	1,94	1,60	19,69	32,16	30,60	19,17
	7-6	2,39	1,95	13,11	26,10	27,60	15,91
	7-7	2,10	1,75	16,63	29,71	35,00	19,97
	7-9	2,26	1,90	14,23	27,61	27,10	17,50
	7-11	2,36	2,05	12,63	26,44	26,70	14,99
	7-12	1,82	1,55	21,66	34,28	38,50	24,01
	7A-1	2,10	1,70	17,12	29,71	31,80	18,40
	7A-4	2,00	1,65	18,52	31,19	47,10	26,89
	7A-5	1,89	1,60	20,21	33,01	36,40	21,10
	7A-6	1,80	1,45	23,42	34,66	60,60	34,05
	7A-8	2,36	2,00	12,95	26,44	27,50	22,67
7A-10	1,87	1,55	21,09	33,36	31,30	22,67	
7A-11	1,92	1,60	19,89	32,49	40,00	24,49	
7A-12	1,76	1,45	23,95	35,45	37,30	26,49	