

ALBERT AUGUSTO DE ASSIS

**ENDENTAÇÃO DINÂMICA APLICADA NA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA E DE PAINÉIS DE MADEIRA**

Botucatu

2020

ALBERT AUGUSTO DE ASSIS

**ENDENTAÇÃO DINÂMICA APLICADA NA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA E DE PAINÉIS DE MADEIRA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Dr. Adriano Wagner Ballarin

Botucatu

2020

A848e Assis, Albert Augusto de
Endentação dinâmica aplicada na predição de propriedades
físico-mecânicas da madeira serrada e de painéis de madeira /
Albert Augusto de Assis. -- Botucatu, 2020
95 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Adriano Wagner Ballarin

1. Madeira. 2. Testes dinâmicos. 3. Matéria - Propriedades. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

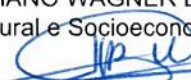
TÍTULO DA TESE: ENDENTAÇÃO DINÂMICA APLICADA NA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA E PAINÉIS DE MADEIRA

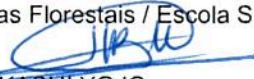
AUTOR: ALBERT AUGUSTO DE ASSIS

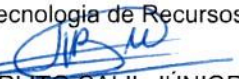
ORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN

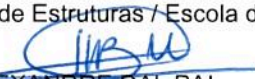
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


P/ Prof. Dr. JOSE NIVALDO GARCIA
Ciências Florestais / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz


P/ Dr. TAKASHI YOJO
Centro de Tecnologia de Recursos Florestais / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo


P/ Prof. Dr. CARLITO CALIL JÚNIOR
Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos/USP


P/ Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 27 de maio de 2020

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai, por tudo.

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

Ao companheiro e amigo Espírito Santo, pela presença constante.

A minha querida esposa Linda e aos meus filhos Bruno e Livia pelo apoio, incentivo, carinho e compreensão.

Aos meus pais Luiz e Rita pelo exemplo e inspiração que sempre foram.

Ao Dr. Adriano Wagner Ballarin pela inestimável orientação, paciência e amizade.

Ao Dr. Sérgio Augusto Rodrigues pela disposição, cordialidade e ajuda em todo o processamento estatístico.

Aos técnicos e amigos Reinaldo Cristiano Vernini, Pedro Tavares Júnior e Ailton de Lima Lucas por todas as idéias e apoio na realização dos ensaios.

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

A todos os meus amigos e familiares por todo incentivo e por todas as lutas e alegrias compartilhadas ao longo destes anos.

RESUMO

Este trabalho avaliou o potencial de utilização de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica para predição de propriedades físico-mecânicas da madeira, de painéis de madeira de média densidade (MDP) e de pisos laminados. A técnica apresentada consistiu em identificar diversos parâmetros de seis ciclos do ensaio dinâmico, selecioná-los por meio de método estatístico e utilizá-los para predição das propriedades de interesse com o uso de regressão múltipla. No programa experimental foram estudadas nove espécies de madeira de diferentes densidades, 40 painéis MDP convencionais, 10 painéis de alta performance (HPP) e 60 peças de pisos laminados. Os ensaios de endentação dinâmica foram realizados com o uso de um durômetro portátil automatizado e processados em um programa computacional desenvolvido especificamente para análise do fenômeno de endentação. Foram obtidos 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica, os quais foram selecionados por meio do método *Stepwise* e utilizados na calibração dos modelos de regressão múltipla. A capacidade de generalização dos modelos foi avaliada por meio de validação cruzada *k-fold*. Os resultados de calibração revelaram bons coeficientes de determinação na predição de quatro propriedades da madeira ($0,84 \leq R^2 \leq 0,98$), cinco propriedades dos painéis MDP ($0,84 \leq R^2 \leq 0,89$) e sete propriedades dos painéis HPP ($0,78 \leq R^2 \leq 0,98$). Os modelos apresentaram baixos erros de predição (RMSE) e boa performance na etapa de validação. Os valores preditos do ensaio de resistência à deformação estática dos pisos laminados foram categorizados e utilizados na classificação das peças obtendo acurácia de 90% e coeficiente *kappa* de classificação de 0,8. O ensaio de endentação demonstrou potencial para ser utilizado como método alternativo para predição de diversas propriedades físico-mecânicas da madeira e de seus produtos, podendo ser aplicado com o uso de um equipamento portátil com procedimento de operação simples e expedito.

Palavras-chave: Endentação dinâmica. Madeira. Painéis de madeira de média densidade. Pisos laminados. Propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the use of characteristics of the dynamic indentation test to predict physical-mechanical properties of sawn wood, particleboard and laminate flooring. The technique here introduced consists of identifying many characteristics from six cycles of the dynamic test, selecting them by means of a statistical method and using them to predict the desired properties by means of multiple regression. The experimental program studied 9 wood species varying in densities, 40 three-layer standard particleboards, 10 high-performance particleboards (HPP) and 60 pieces of laminate flooring. The dynamic indentation tests were performed using an automated portable tester and were processed by a software specifically designed for dynamic indentation analysis. Predictor variables were selected by Stepwise method from a set of 144 characteristics of the dynamic test and used for calibration of multiple regression models. The generalization performance of the models was assessed by means of k-fold cross validation. The calibration tests revealed good coefficients of determination in the prediction of four properties of sawn wood ($0.84 \leq R^2 \leq 0.98$), five properties of particleboard ($0.84 \leq R^2 \leq 0.89$) and seven properties of high-performance particleboards ($0.78 \leq R^2 \leq 0.98$). The models reached low prediction errors (RMSE) and good performance in the validation process. The pieces of laminate flooring were classified using the results of the predicted residual deformation to static load, reaching accuracy of 90% and a kappa coefficient of classification of 0.8. The dynamic indentation test revealed potential to be used as an alternative method for estimating various physical-mechanical properties of the wood and wood products. It can be applied with a portable tester using a simple and quick procedure.

Keywords: Dynamic indentation. Wood. Particleboard. Laminate flooring. Physical-mechanical properties.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
1 CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DO POTENCIAL TECNOLÓGICO DA ENDENTAÇÃO DINÂMICA NA MADEIRA.....	17
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	22
1.2.1 Material do estudo e ensaios convencionais	22
1.2.2 Ensaio de endentação dinâmica e parâmetros característicos avaliados	23
1.2.3 Análise dos dados	29
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
1.3.1 Ensaios convencionais	29
1.3.2 Ensaios de endentação dinâmica	29
1.3.3 Predição de propriedades com uso de regressão linear simples	34
1.3.4 Predição de propriedades com uso de regressão múltipla	36
1.4 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42
2 CAPÍTULO 2 - PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS MDP POR MEIO DO ENSAIO DE ENDENTAÇÃO DINÂMICA	45
2.1 INTRODUÇÃO	47
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	49
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
2.4 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	67
3 CAPÍTULO 3 - PREDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO ESTÁTICA DE PISOS LAMINADOS POR MEIO DO ENSAIO DE ENDENTAÇÃO DINÂMICA	71
3.1 INTRODUÇÃO	73
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	75
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
3.4 CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS	90
CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO GERAL

A dureza é um importante indicador da qualidade da madeira, pois pode ser avaliada por ensaios relativamente simples e apresenta boa correlação com outras propriedades mecânicas importantes do material como, por exemplo, a compressão paralela e normal às fibras (IBAMA, 1993).

Os ensaios clássicos de dureza da madeira - Brinell e Janka - datam do início do século XX e são realizados até os dias de hoje de forma semelhante à que foram concebidos, possivelmente por que são considerados métodos satisfatórios (BESLIU et al., 2015). Nestes ensaios um endentador metálico de geometria esférica é pressionado contra o material, sendo o valor da dureza obtido pela razão entre a força aplicada e a endentação promovida no material (DOYLE; WALKER, 1980).

Mais recentemente, a dureza dinâmica tem sido apresentada como alternativa aos ensaios tradicionais de dureza estática para madeira, pois, além ser um ensaio mais rápido, pode utilizar equipamentos mais simples, com grande potencial de se tornarem portáteis (COLENCI 2006; MEYER et al., 2011; ASSIS 2015).

Dentro desta linha de pesquisa, a Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP de Botucatu-SP vem, desde 2006, trabalhando no desenvolvimento de um equipamento para avaliação da dureza dinâmica da madeira - durômetro portátil para madeiras.

A primeira versão do equipamento, um durômetro não automatizado de baixo custo, apresentou grande funcionalidade e leituras de dureza dinâmica bem correlacionadas com a dureza Janka (COLENCI, 2006). Na segunda versão, um durômetro equipado com acelerômetro, os resultados revelaram grande potencial com uma possível associação da aceleração, velocidade e deslocamento do equipamento com parâmetros visco-elásticos da madeira (BALLARIN et al., 2010). A terceira versão do equipamento (ASSIS, 2015 - Figura 1) agregou satisfatoriamente a automação das medições de dureza por meio de transdutor de deslocamento e processador eletrônico embarcado, promovendo leituras rápidas e confiáveis de endentação bem como da dureza dinâmica.

Figura 1 - Terceira versão do durômetro portátil: a) painel eletrônico de operação, b) equipamento na posição de operação, isto é, vertical e c) equipamento na posição horizontal



Em estudo posterior, Alexandre (2015) demonstrou que da análise mais detalhada do fenômeno envolvido no ensaio de endentação dinâmica podem ser obtidas estimativas precisas de outras propriedades mecânicas da madeira serrada, para além da dureza Janka já obtida. Com base nos sinais de deslocamentos, coletados com a terceira versão do durômetro portátil, obteve sinais derivados de

velocidade e aceleração e deles extraiu 18 parâmetros característicos do fenômeno de endentação, sobretudo aqueles registrados no primeiro ciclo do ensaio. Com uso de regressão múltipla encontrou forte associação ($0,71 \leq R^2 \leq 0,98$) entre as propriedades mecânicas de resistência e rigidez da madeira mensuradas em ensaios convencionais e as inferidas a partir dos parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica.

Na continuidade desta linha de pesquisa, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica para predição de propriedades físico-mecânicas de madeira serrada, painéis de madeira de média densidade (MDP) e de pisos laminados.

Foram utilizados 144 parâmetros característicos obtidos de seis ciclos do ensaio dinâmico para predição das propriedades de interesse. Ensaio de endentação dinâmica com mobilização de energia por queda livre de massa promovem endentações complementares à do primeiro impacto – primeiro ciclo - devido ao ricochete do endentador (COLENCI, 2006). Um ciclo do ensaio dinâmico corresponde ao período de tempo que compreende as suas fases de queda livre, carregamento, descarregamento e movimento livre de retorno do endentador. A endentação, propriamente dita, se refere à fase de carregamento, somente.

No primeiro capítulo verificou-se a viabilidade de predição das propriedades densidade, resistência à compressão paralela e módulos de ruptura e de elasticidade à flexão de madeira serrada e resistência à tração perpendicular de painéis MDP. Também avaliou-se a relevância da utilização de parâmetros característicos de diversos ciclos do ensaio de endentação dinâmica para predição destas propriedades.

No segundo capítulo estudou-se a possibilidade de predição de 10 propriedades físico-mecânicas de painéis MDP comuns e, também, de painéis de alta performance. Foram comparados resultados de modelos gerais de regressão - calibrados para as duas categorias de painéis simultaneamente - com os resultados de modelos específicos - calibrados para cada categoria individualmente. Também foram testados métodos estatísticos para seleção de variáveis preditoras

(PLS - *Partial Least Squares*, LASSO - *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* e Stepwise).

No terceiro capítulo os parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica foram utilizados para predição da deformação residual de pisos laminados, os quais foram fabricados com substratos de painéis de alta performance utilizando diferentes combinações de teor de resina, espessura e fator de prensagem. Os resultados preditos de deformação residual foram classificados em "aprovado" e "reprovado" e comparados por meio de matriz de confusão com os resultados de classificação obtidos pelos valores mensurados de deformação residual.

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DO POTENCIAL TECNOLÓGICO DA ENDENTAÇÃO DINÂMICA NA MADEIRA

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica para predição de propriedades físico-mecânicas de madeira serrada e de painéis de partículas de madeira de média densidade (MDP). O programa experimental foi conduzido com amostras de nove espécies de madeira de diferentes densidades e 40 painéis MDP com espessuras variando entre 12 e 25 mm. As propriedades densidade, resistência à compressão paralela, módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática – para madeira serrada - e resistência à tração perpendicular – para painéis MDP - foram obtidas convencionalmente e inferidas a partir de parâmetros selecionados do ensaio de endentação dinâmica, usando regressão múltipla e obtendo coeficientes de determinação de 0,84 a 0,98 e baixos erros de predição (RMSE). O ensaio de endentação dinâmica demonstrou ter grande potencial de ser utilizado como método alternativo para predição de propriedades físico-mecânicas da madeira e de painéis MDP, pois além de possibilitar a predição de diversas propriedades da madeira a partir de um único teste de procedimento simples e expedito, também pode simplificar a obtenção da resistência à tração perpendicular de painéis MDP, cujo ensaio convencional é trabalhoso.

Palavras-chave: Endentação dinâmica. Propriedades físico-mecânicas. Madeira. Painel de madeira reconstituída.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the potential of using characteristics of the dynamic indentation test for prediction of physical-mechanical properties of sawn wood and particleboard. The experimental program employed 9 wood species of different densities and 40 particleboards, with thickness ranging from 12 to 25 mm. The properties density, resistance to the parallel compression, modulus of elasticity and modulus of rupture of the wood and the internal bonding of the particleboard were estimated from selected parameters of the dynamic indentation test using multiple regression analysis, which provided coefficients of determination from 0.84 to 0.98 and low prediction errors (RMSE). The dynamic indentation test revealed good potential to be used as an alternative method for estimating physical-mechanical properties of the wood and particleboard. Besides allowing the prediction of several properties of wood from a single test, using a simple and quick procedure, it can also be a simpler method to evaluate the internal bonding of particleboard, which conventional evaluation is laborious.

Keywords: Dynamic indentation. Physical-mechanical properties. Wood. Particleboard.

1.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos reportados sobre a dureza dos materiais aplicavam-se a minerais e datam do século XVII. Em 1729 Pieter van Musschenbroek registrou o primeiro ensaio do gênero para madeira, onde um formão preso a um pêndulo era utilizado para estudo da dureza dinâmica de diversos tipos de madeiras e metais (TODHUNTER, 2014). Os equipamentos para medição de dureza tornaram-se disponíveis comercialmente por volta de 1900 devido, principalmente, à necessidade de controle de qualidade na produção em massa de componentes para a indústria automotiva e máquinas ferramenta (WALLEY, 2012).

O primeiro ensaio de dureza por endentação estática, padronizado e reconhecido industrialmente na área de metalurgia, foi desenvolvido por Johan August Brinell em 1900 (SZILÁGYI, 2013). Este ensaio consiste em pressionar uma esfera de aço com uma força conhecida sobre a superfície do material em avaliação, sendo o valor da dureza obtido pela razão entre a força aplicada e a área da calota esférica impressa no material (SONMEZ; DEMIR, 2007). Poucos anos mais tarde, em 1906, o austríaco Gabriel Janka adaptou o ensaio Brinell para aplicação em madeira, pois teve dificuldade em medir, de modo preciso, a deformação permanente produzida nesse material (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). A dureza Janka expressa a força necessária para endentar uma esfera de aço na madeira até a metade de seu diâmetro. Utiliza convenientemente uma esfera com diâmetro de 11,284 mm, pois em meia endentação se obtêm uma área projetada de 100 mm². Esta adaptação foi rapidamente aceita ao redor do mundo e o ensaio foi normatizado em 1927 pela Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (ASTM).

A partir da publicação dos estudos de Janka, a dureza passou a ser alvo de inúmeras investigações, tendo como foco principal a comparação dos métodos Janka e Brinell e tentativas de superar limitações apresentadas nos dois métodos (DOYLE, 1980). O teste Janka é criticado principalmente por causa da magnitude das forças envolvidas no ensaio e consequente possibilidade de ruptura do material avaliado (NIEMZ; STÜBI, 2000; HELIŃSKA-RACZKOWSKA; MOLIŃSKI, 2003); já o ensaio Brinell tem limitações relacionadas, principalmente à dificuldade em medir precisamente o diâmetro da endentação residual promovida no material (HANSSON; ANTTI, 2006; HERÄJÄRVI, 2004).

Apesar das diversas pesquisas empreendidas nas últimas décadas, tanto o ensaio Brinell quanto o ensaio Janka ainda são utilizados de forma semelhante à que foram concebidos, possivelmente por que são considerados métodos satisfatórios (BESLIU et al., 2015). Dentre os estudos reportados na literatura desde Janka cabe destaque aos de Tabor (1951) que permitiram avanços, ao relacionar a curva de descarregamento com as propriedades plásticas e elásticas dos materiais e aos de Lewis (1968), que introduziram o conceito de módulo de dureza - dado pela inclinação do diagrama de força versus profundidade de endentação - para utilização em materiais de baixa espessura, pois pode ser obtido com o emprego de pequenas endentações, na faixa de 2,5mm. Este último foi incluído na norma americana ASTM D1037-78 para avaliação da dureza de painéis à base de madeira.

Mais recentemente pesquisas têm impulsionado avanços razoáveis para os testes de dureza da madeira e seus derivados, quer seja pela substituição dos ensaios tradicionais por ensaios dinâmicos (COLENCI, 2006; MEYER et al., 2011; ASSIS, 2015), os quais permitem mobilidade, ou pela utilização de características específicas do fenômeno de endentação para estimativa de outras propriedades mecânicas do material, além da própria dureza (AUGUTIS et al., 2005; BALLARIN et al., 2012; BESLIU et al. 2015; ALEXANDRE, 2015).

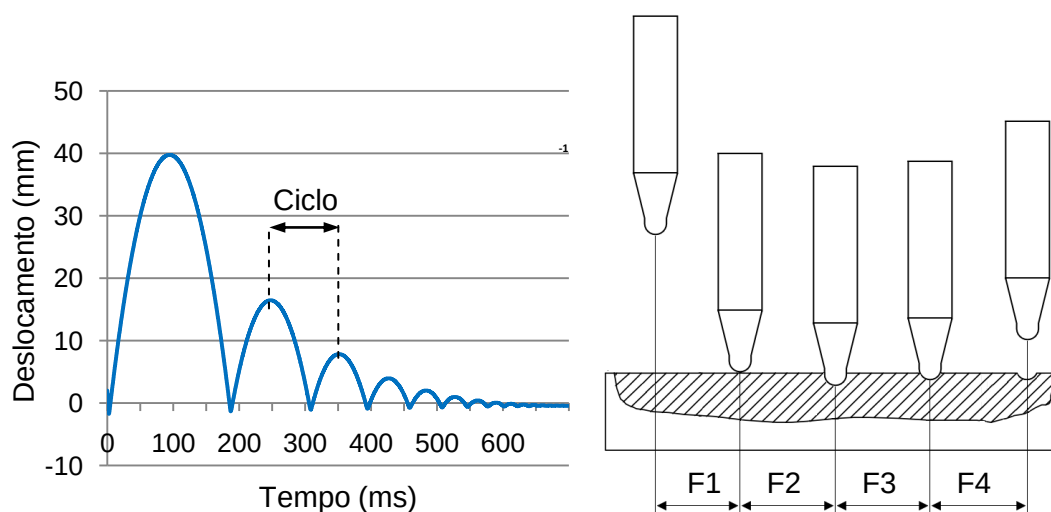
Assis (2015) desenvolveu um durômetro portátil automatizado para avaliação da dureza dinâmica da madeira, o qual permitiu a obtenção de leituras rápidas e confiáveis de endentação e o cálculo preciso da dureza dinâmica do material. Por realizar a medição da endentação sob carga, o equipamento mostrou-se imune aos efeitos de recuperação da área endentada - já reportados por Janka quando do uso da metodologia Brinell - e afundamento do contorno da endentação (*sinking in*), que afetam a precisão das medições realizadas a partir dos ensaios clássicos de dureza estática (HOLMBERG, 2000; GREKIN; VERKASALO, 2013; NIEMZ; STÜBI, 2000; HERÄJÄRVI, 2004; HANSSON; ANTTI, 2006).

Estudos têm mostrado que da análise mais detalhada do fenômeno envolvido no ensaio de endentação dinâmica podem ser obtidas estimativas precisas de outras propriedades da madeira, além da própria dureza. Alexandre (2015), em estudo com madeiras de cinco espécies de eucalipto utilizadas para produção de dormentes, encontrou forte associação ($0,71 \leq R^2 \leq 0,98$) entre as propriedades mecânicas

mensuradas em ensaios convencionais e as inferidas a partir de 18 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica. Utilizou-se dos sinais de deslocamento, velocidade e aceleração do ensaio dinâmico, sobretudo aqueles registrados no primeiro ciclo de endentação.

Ensaio de endentação dinâmica com mobilização de energia por queda livre de massa promovem endentações complementares à do primeiro impacto – primeiro ciclo - devido ao ricochete do endentador. Caracterizam-se, assim, por diversos ciclos (COLENCI, 2006), que ampliam ainda mais a quantidade de parâmetros característicos do fenômeno que podem estar relacionadas às propriedades físico-mecânicas do material. Um ciclo do ensaio de dinâmico (Figura 1.1) corresponde ao período de tempo que compreende as suas fases de queda livre (F1), carregamento (F2), descarregamento (F3) e movimento livre de retorno do endentador (F4). A endentação, propriamente dita, se refere à fase de carregamento, somente.

Figura 1.1 - Ciclos do ensaio de endentação dinâmica e suas fases



Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da utilização de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica em seus diversos ciclos de endentação para a predição de propriedades físico-mecânicas de madeira serrada e de painéis de partículas de madeira de média densidade (MDP).

1.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliar o potencial preditivo de parâmetros característicos extraídos do ensaio de endentação dinâmica, o programa experimental foi desenvolvido com madeiras serradas cobrindo um amplo espectro de densidades e painéis de MDP de diferentes espessuras. Esses materiais foram submetidos a ensaios convencionais destrutivos - para determinação de suas propriedades físico-mecânicas - e a ensaios de endentação dinâmica. Os parâmetros do ensaio de endentação dinâmica foram utilizados para predição das propriedades por meio de regressões.

1.2.1 Material do estudo e ensaios convencionais realizados

O programa experimental empregou nove espécies de madeira com densidades¹ variando de 442 a 1097 kg m⁻³ (Tabela 1.1) e 40 painéis MDP com espessuras variando de 12 a 25 mm (10 painéis por espessura). De cada espécie de madeira foram confeccionados três corpos de prova (cps) nas dimensões de (50 x 50 x 150) mm³ e três cps nas dimensões de (25 x 25 x 575) mm³, que foram ensaiados, respectivamente, à compressão paralela às fibras (resistência – f_{c0}) e à flexão estática (resistência – MOR e rigidez – MOE), seguindo, no geral, os requisitos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 1.1 - Espécies de madeira utilizadas nos ensaios experimentais e suas respectivas densidades

Espécie	Nome popular	Densidade (kgm ⁻³)
<i>Pinus elliotti</i>	pinus elliottii	442
<i>Eucaliptus</i> spp.	eucalipto	782
<i>Apuleia leiocarpa</i>	garapeira	811
<i>Goupia glabra</i>	peroba-do-norte	822
<i>Martiodendron elatum</i>	tamarindo, jutaí	931
<i>Dipteryx odorata</i>	cumaru	974
<i>Tabebuia</i> spp.	ipê	981
<i>Peltogyne</i> spp.	roxinho	1042
<i>Hymenaea courbaril</i>	jatobá	1097

¹ Densidade à umidade de equilíbrio, ou seja, em torno de 12%

Todos os painéis MDP empregados no programa experimental foram do tipo de três camadas, produzidos industrialmente com madeira de eucalipto e resina uréia-formaldeído e prensados em sistema de prensagem contínua com a pressão específica de 2,84 MPa. A Tabela 1.2 apresenta os valores médios dos principais parâmetros de processos empregados na fabricação destes painéis.

Tabela 1.2 - Principais parâmetros de processo utilizados na fabricação dos painéis

Espessura (mm)	Tempo de prensagem (s)	Temp. de prensagem (°C)	Densidade (kg m ⁻³)	Taxa de compactação	Teor de resina ² (%CI / %CE)
12	43	197	640	1,48	6,8 / 9,0
15	46	198	635	1,47	
18	56	198	630	1,46	
25	87	198	620	1,44	

De cada painel foram obtidos nove cps nas dimensões de (50 x 50) mm², os quais foram submetidos ao teste de resistência à tração paralela (RTP), conforme protocolo definido na norma brasileira NBR 14810-2 (ABNT, 2013).

1.2.2 Ensaio de endentação dinâmica e parâmetros característicos avaliados

Os ensaios de endentação dinâmica na madeira foram realizados após a realização dos ensaios convencionais e nos mesmos cps utilizados nestes. Para os painéis de MDP foram realizados em outros nove cps, retirados dos mesmos painéis, de posições adjacentes às dos cps dos ensaios convencionais. Foram realizadas três repetições do ensaio de endentação dinâmica em cada corpo de prova de madeira serrada e de painéis MDP.

Os ensaios de endentação dinâmica foram realizados com um durômetro portátil dotado de transdutor de deslocamento e processador embarcado, apresentado em detalhes em Assis (2015). Utiliza-se de endentador esférico de 10 mm de diâmetro e energia de endentação de 1,96 J, obtida pela combinação da elevação de uma massa de 1 kg a uma altura de 200 mm.

² CI: Camada interna CE: Camada externa

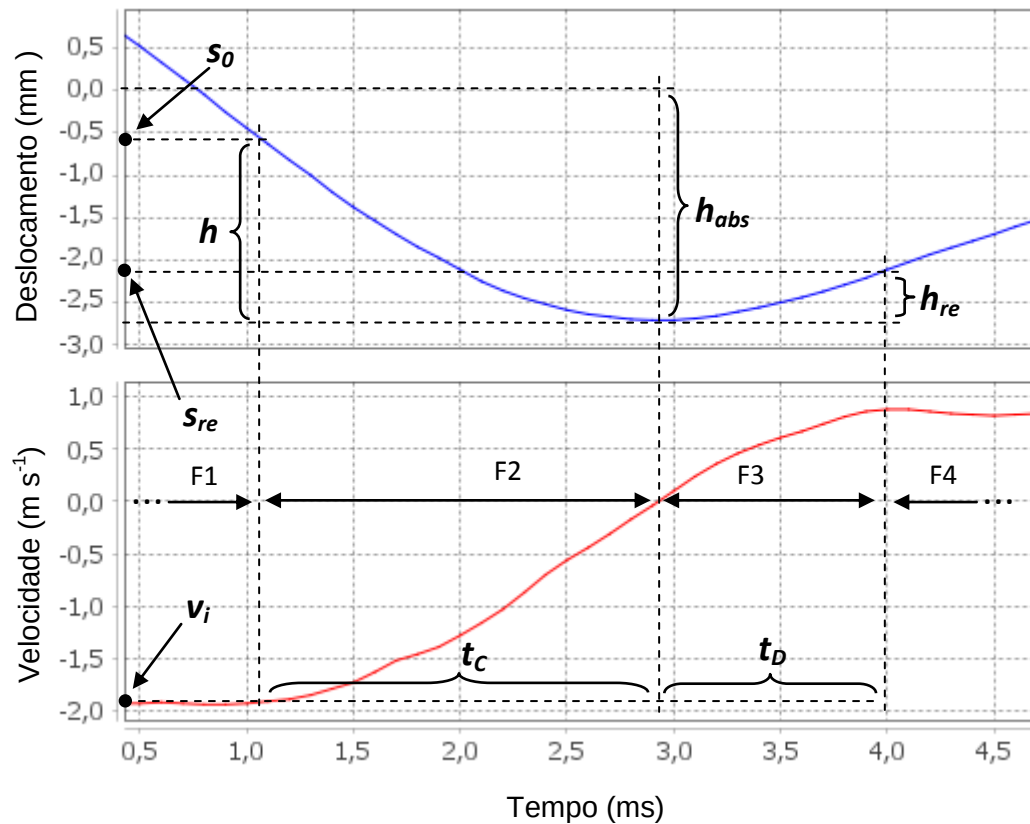
Com o durômetro portátil foi possível registrar o sinal de deslocamento do endentador por um período de 694 ms a uma taxa de 10 kHz e assim avaliar os seis primeiros ciclos de cada ensaio. Estudos preliminares evidenciaram que em painéis de MDP é comum se observar até 18 ciclos para dissipação completa da energia, o que ocorre em torno de 900 ms.

Os sinais de deslocamento registrados pelo durômetro portátil foram processados no *Wood Indentation Analyzer*³ (WIA), programa computacional desenvolvido especificamente para este fim. Além de aplicar filtros no sinal original de deslocamento e realizar a derivação deste sinal em velocidade e, posteriormente, em aceleração, o WIA foi responsável por aplicar os algoritmos para extração dos parâmetros característicos selecionados e mensurados diretamente (deslocamentos, velocidades, acelerações e tempo) e dos parâmetros calculados indiretamente como, por exemplo, as forças - obtidas pelo produto da massa do endentador por sua aceleração. Todos os parâmetros obtidos direta e indiretamente dos sinais digitais foram selecionados a partir de ensaios piloto.

Os instantes em que ocorrem as mudanças das fases de cada ciclo do ensaio dinâmico foram identificados a partir da análise de seus sinais de velocidade e de deslocamento. Para o primeiro ciclo, por exemplo, a fase de carregamento (F2 - Figura 1.1) inicia-se no instante em que o deslocamento é igual a zero (endentalor toca a madeira); já para o segundo ciclo, esse instante é identificado quando velocidade alcança seu valor máximo negativo, proporcionado pelo movimento de queda livre (v_i - Figura 1.2). Quando a profundidade de endentação atinge o valor máximo (h), ocasião em que a velocidade é igual a zero, inicia-se a fase de recuperação elástica ou descarregamento (F3 - Figura 1.2), isto é, fase em que o endentalor é acelerado no movimento reverso até perder o contato com a madeira. Neste instante, que é detectado quando a velocidade atinge seu valor máximo positivo, inicia-se a fase de movimento livre de retorno do endentalor, ocasião em que é mensurado o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}).

³ Patente requerida

Figura 1.2 - Exemplo de identificação das fases do ensaio dinâmico a partir de seus sinais de deslocamento e velocidade



O ensaio de endentação dinâmica foi analisado a partir de parâmetros característicos de cada fase de seus ciclos e, também, a partir de parâmetros representativos do ensaio completo. Ainda, alguns parâmetros cogitados inicialmente (ensaios piloto) para análise acabaram, por fim, removidos, por serem altamente correlacionados a outros. Como exemplo citam-se a altura inicial e o tempo total de queda livre ou, ainda, a energia potencial inicial e a energia cinética no início do carregamento. Todos os parâmetros da fase de queda livre foram resumidos exclusivamente à velocidade inicial de carregamento - v_i .

Os parâmetros selecionados e obtidos de cada fase foram:

Fase de queda livre: velocidade inicial da fase de carregamento (v_i).

Fase de carregamento: dureza dinâmica (HD), profundidade efetiva (h) e absoluta (h_{abs}) de endentação, deslocamento inicial de endentação (s_0), tempo de endentação (t_c), força média (F_{medC}) e máxima (F_{maxC}) de carregamento, taxa de carregamento (T_C) e relação força-deslocamento em 5 segmentos da endentação ($R_{fd1..5}$).

Fase de descarregamento: deslocamento de recuperação elástica (h_{re}), deslocamento final de recuperação (s_{re}), tempo de recuperação elástica (t_{re}), força média (F_{medD}) de descarregamento, taxa de descarregamento (T_D), fator (f_{re}) e taxa (T_{re}) de recuperação elástica.

Fase de movimento livre de retorno: deslocamento de recuperação (s_r), taxa de decremento parcial (δ) e fator de amortecimento (b).

Os parâmetros relacionados com o ensaio completo foram o fator de amortecimento total (b_t) e taxa de decremento total (δ_t).

A dureza dinâmica foi calculada a partir da Eq.1.1 (ASSIS et al., 2017), onde HD é a dureza dinâmica (MPa), F é a força média resultante do impulso da endentação (N), D é o diâmetro do endentador (mm), h é a profundidade de endentação (mm), m é a massa do endentador (kg), Δv é a variação da velocidade durante a endentação ($m\ s^{-1}$) e Δt é o tempo de endentação (s).

$$HD = \frac{F}{\pi D h} = \frac{m \frac{\Delta v}{\Delta t}}{\pi D h} \quad (1.1)$$

As taxas de decremento parcial (δ) e total (δ_t), que expressam o decremento logarítmico do amortecimento observado nos ciclos do ensaio dinâmico, foram calculadas a partir da Equação geral 1.2, onde δ é a taxa de decremento logarítmico, A_i é a altura inicial de queda livre (mm), s_r é o deslocamento de recuperação (mm) e n é o número de ciclos analisados. A taxa de decremento total utiliza a altura inicial do ensaio (200 mm) e o deslocamento de recuperação do sexto ciclo.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_i}{s_r}\right) \quad (1.2)$$

O fator de amortecimento foi calculado com a Eq. 1.3, onde b é o fator de amortecimento ($kg\ s^{-1}$), m é a massa do endentador (kg), t é o tempo (s), A_i é a altura inicial de queda livre (mm), e s_r é o deslocamento de recuperação (mm).

$$b = -\frac{2m}{t} \ln \frac{s_r}{A_i} \quad (1.3)$$

As taxas de carregamento e descarregamento (em N mm^{-1}) foram obtidas a partir das razões entre a força máxima (N) e os deslocamentos efetivos empreendidos nas fases de carregamento e descarregamento (mm), respectivamente.

O fator de recuperação elástica expressou a razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) de cada ciclo e a endentação absoluta do primeiro ciclo (h_{abs}), já a taxa de recuperação elástica, dada em mm s^{-1} , foi obtida a partir da razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) e o intervalo de tempo (Δt) decorrido desde o instante em que ocorreu a profundidade máxima de endentação do primeiro ciclo e o instante inicial de carregamento do ciclo em análise. Ao invés de utilizar o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}) para cálculo do fator e taxa de recuperação, se utiliza o deslocamento inicial de endentação (s_0), pois este último, a partir do segundo ciclo, indica a parcela de deformação restituída no material. Por este motivo, tanto o fator quanto a taxa de recuperação elástica foram medidos somente a partir do segundo ciclo do ensaio.

As relações força-deslocamento das frações de tempo da endentação foram calculadas conforme procedimento já adotado anteriormente em Alexandre (2015). O intervalo de tempo de endentação foi dividido em cinco segmentos de mesma duração, sendo o valor médio da razão força-deslocamento calculado para cada um destes segmentos. Essas relações expressam grandezas com a mesma natureza da rigidez do material, ou seja, força para promover um deslocamento unitário.

Com isso, foram a final selecionados 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica ($22 + 24 \times 5 + 2$), sendo 22 do primeiro ciclo (f_{re} e T_{re} não são calculados neste período), 24 nos próximos cinco ciclos e 2 parâmetros característicos do ensaio completo (b_t e δ_t). Cada parâmetro foi representado pelo seu valor médio obtido de três repetições do ensaio realizadas em cada cp.

1.2.3 Análise dos dados

Os parâmetros do ensaio de endentação dinâmica foram utilizados para predição das propriedades densidade (D), resistência à compressão paralela (f_{c0}), módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura à flexão estática (MOR) da

madeira e, também, para predição da resistência à tração perpendicular (RTP) de painéis MDP.

Inicialmente foram verificadas as correlações lineares entre cada parâmetro particular do ensaio de endentação dinâmica e as propriedades da madeira e dos painéis MDP. Para os parâmetros com maiores correlações foram estudadas regressões lineares simples, que foram avaliadas pelos seus coeficientes de determinação (R^2).

Posteriormente, os parâmetros do ensaio de endentação dinâmica foram selecionados por meio do método estatístico *Stepwise* (MONTGOMERY; RUNGER, 2009) e utilizados para predição das propriedades de interesse a partir de regressão múltipla. Estas regressões foram realizadas em 6 etapas distintas: na primeira, empregaram-se somente parâmetros do primeiro ciclo do ensaio dinâmico; já na segunda foram utilizados parâmetros tanto do primeiro quanto do segundo ciclo, e assim sucessivamente até o sexto ciclo.

Todos modelos de predição obtidos a partir das regressões múltiplas foram submetidos a processo de validação pelo método de validação cruzada *k-fold*, utilizando-se 10 repetições com 5 particionamentos (*folds*), ou seja, 80% das amostras foram utilizadas para treinamento dos modelo e 20% das amostras para as suas etapas de validação. A performance dos modelos de predição foi avaliada a partir de seus coeficientes de determinação de validação (R^2_{val}) e, principalmente, por meio do erro quadrático médio de validação (RMSECV).

As análises estatísticas foram realizadas por meio do ambiente computacional “R” versão 3.6.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Ensaios convencionais

Os resultados dos ensaios convencionais apresentaram grandes variações, tanto nas resistências ($29 \leq f_{c0} \leq 96$; $52 \leq \text{MOR} \leq 191$ - MPa) quanto na rigidez da madeira ($6236 \leq \text{MOE} \leq 23060$ MPa), o que era esperado devido a ampla gama de densidades utilizadas (Tabela 1.3). A influência da densidade nos resultados das propriedades mecânicas da madeira também pode ser vista na Tabela 1.3 pela comparação entre os desvios padrões de densidade e dos resultados das propriedades para cada espécie. As amostras de eucalipto e de cumaru por exemplo, que apresentaram a maiores variações de densidade, também apresentaram as maiores variações de f_{c0} e MOE; todavia, a espécie roxinho, que não apresentou grande variação na densidade, obteve grande variação no MOR.

A resistência à tração perpendicular dos painéis MDP apresentou valores de 0,39 a 0,60 MPa, não havendo diferença significativa dessa resistência entre as espessuras estudadas.

Tabela 1.3 - Resultados médios dos ensaios convencionais realizados em madeira seguidos pelo desvio padrão entre parêntesis

Espécie	Propriedades			
	D (kg m^{-3})	f_{c0} (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<i>Pinus elliotti</i> (pinus elliotti)	442 (8,5)	29,01 (2,80)	6236 (1499)	52,31 (9,22)
<i>Eucalyptus</i> spp. (eucalipto)	782 (209)	59,91 (13,58)	17826 (3492)	110,99 (37,81)
<i>Apuleia leiocarpa</i> (garapeira)	811 (12,8)	52,70 (0,41)	12174 (498)	100,47 (6,90)
<i>Goupia glabra</i> (peroba-do-norte)	822 (53,3)	39,93 (4,72)	9024 (1371)	69,19 (20,36)
<i>Martiodendron elatum</i> (tamarindo)	931 (17,9)	82,41 (5,77)	15845 (423)	139,54 (25,59)
<i>Dipteryx odorata</i> (cumaru)	974 (144)	93,93 (15,31)	15535 (4763)	129,37 (17,29)
<i>Tabebuia</i> spp. (ipê)	981 (12,8)	86,62 (1,58)	16356 (383)	144,77 (11,46)
<i>Peltogyne</i> spp. (roxinho)	1042 (11,1)	88,10 (6,04)	18062 (1698)	141,95 (37,85)
<i>Hymenaea courbaril</i> (jatobá)	1097 (8,6)	96,07 (8,38)	23060 (662)	190,87 (17,56)

1.3.2 Ensaios de endentação dinâmica

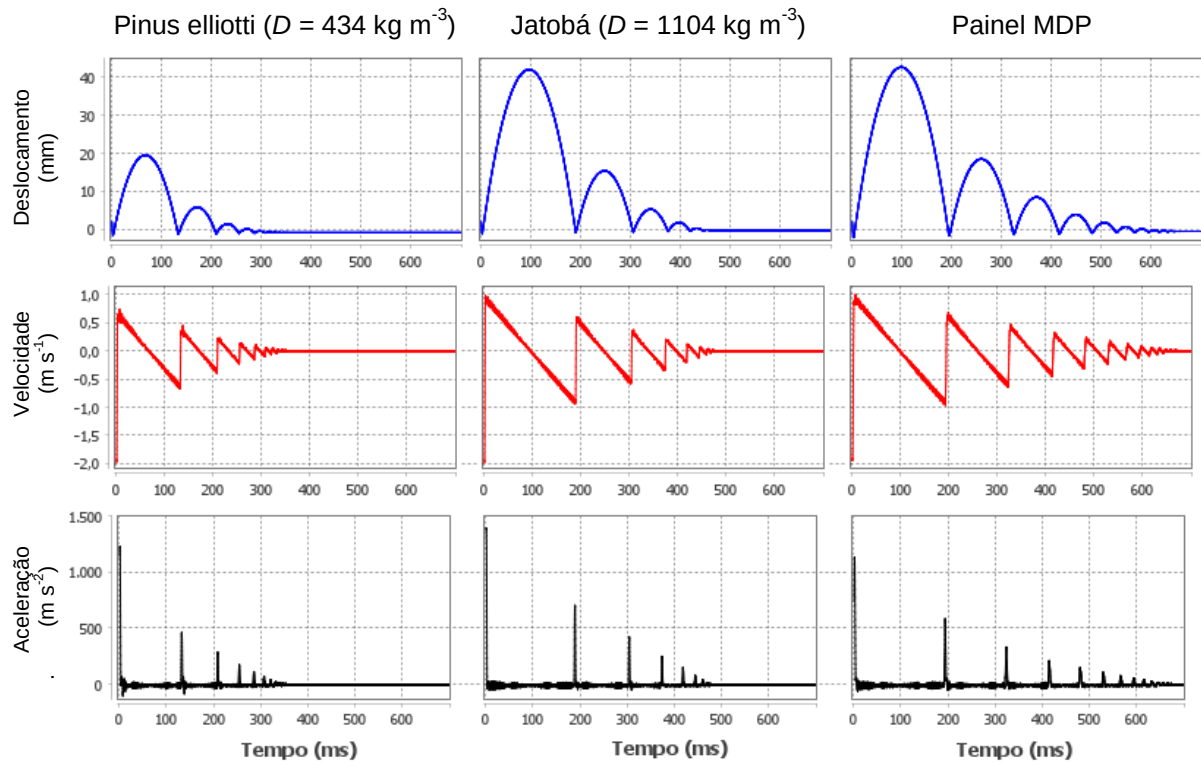
O durômetro portátil utilizado neste estudo proporcionou um procedimento simples e prático para a aplicação do ensaio de endentação dinâmica. Cada ensaio, considerado desde o posicionamento do equipamento sobre a amostra até a sua

finalização, despendeu um tempo de aproximadamente 5 segundos. Os ensaios de resistência à compressão e à flexão estática da madeira despenderam um tempo médio de 18 minutos; os ensaios de resistência à tração perpendicular dos painéis MDP, por sua vez, foram realizados em um tempo médio de 12 minutos. Este último tem protocolos rígidos no tocante ao preparo e condicionamento das amostras e na metodologia, pois exige emprego de suportes metálicos colados à amostra, além de tempo para acondicioná-la e utilização de máquina de universal de ensaios (LEHMANN, 1965).

Os ensaios realizados em painéis MDP apresentaram, em geral, mais ciclos de endentação (em média 12 ciclos) se comparados com os ensaios realizados em madeira (Figura 1.3). Para alguns painéis, o limite de tempo de 694 ms imposto pelo durômetro não foi suficiente para registrar o ensaio dinâmico até o seu término; apesar disso, todos os ensaios realizados puderam conter, pelo menos, 6 ciclos de endentação.

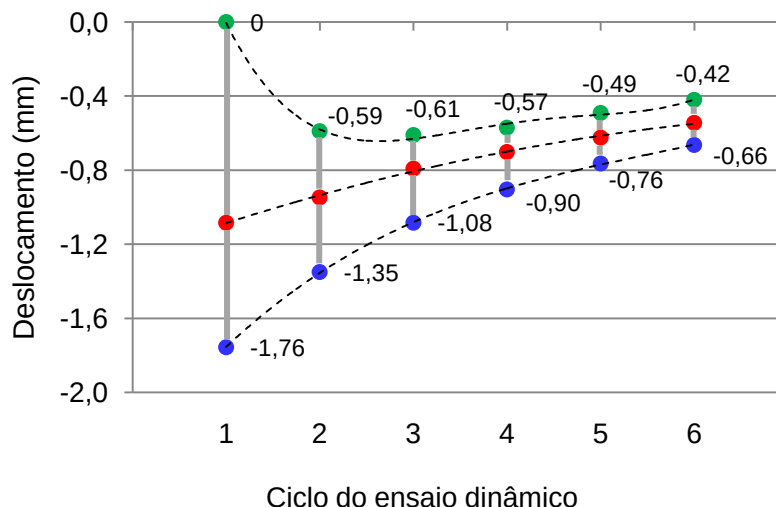
Os ensaios realizados em madeira serrada promoveram de 7 a 13 ciclos e tiveram duração de 210 a 570 ms. Observou-se que o número de ciclos é normalmente menor para as amostras que apresentam menor dureza. Isso pode ser atribuído ao fato de que, para estes casos - onde se promovem maiores endentações - grande parte da energia seja empregada na promoção de deformação plástica; já para as madeiras com dureza elevada, onde se promovem endentações mais rasas, a energia não despendida em deformação plástica é reaproveitada e dissipada ao longo do ensaio, permitindo a ocorrência de mais ciclos de endentações (Figura 1.3).

Figura 1.3 - Comparação de sinais de deslocamento, velocidade e aceleração das espécies pinus elliotti, jatobá e um painel MDP



Em cada ciclo do ensaio dinâmico ocorre dissipação de energia e alteração das parcelas de deformação plástica e elástica. Na Figura 1.4, os pontos verdes indicam as posições iniciais e os azuis as posições finais da fase de carregamento dos 6 primeiros ciclos de um ensaio. Os pontos vermelhos representam a posição final da fase de descarregamento destes mesmos ciclos. Como se pode observar, a primeira endentação promove grande parte da deformação permanente. Como as endentações posteriores utilizam apenas uma pequena fração da energia inicial e ocorrem sobre o material já deformado (ponto verde com posição inicial negativa), elas têm pouca capacidade de produção de deformação permanente (Figura 1.4). A segunda endentação, por exemplo, inicia o carregamento na posição - 0,59 mm e alcança a profundidade de -1,35 mm, produzindo uma endentação efetiva de 0,76 mm.

Figura 1.4 - Posições iniciais e finais de carregamento e descarregamento de 6 ciclos de um ensaio dinâmico



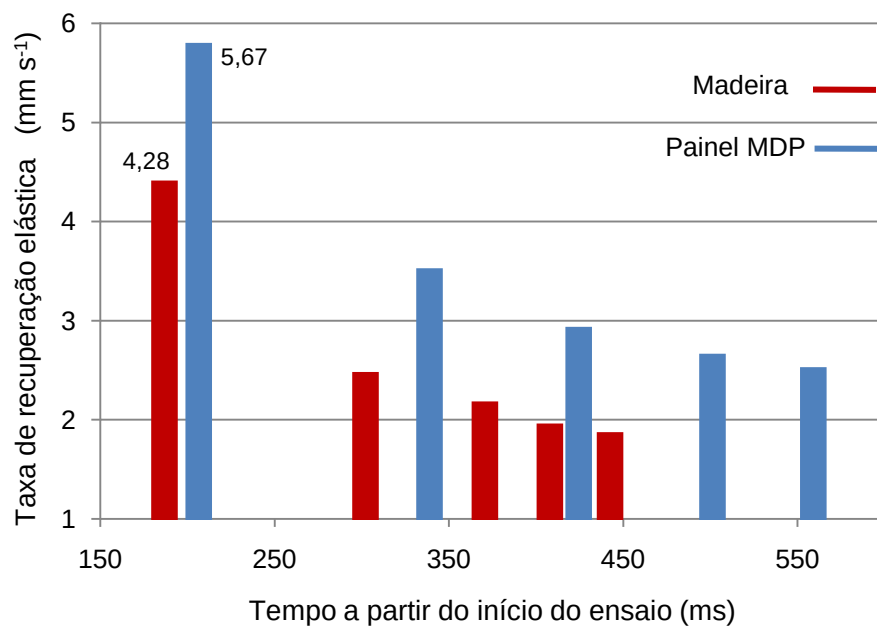
Em cada impacto sucessivo da Figura 1.4 observa-se a diminuição tanto da profundidade efetiva (distância entre os pontos azul e verde em cada endentação) quanto da profundidade absoluta de endentação (ponto azul). A primeira é devida ao decréscimo gradual de energia do ensaio, pois cada impacto é empreendido com uma quantidade de energia menor que a do impacto anterior; já a diminuição da profundidade absoluta ocorre por causa da recuperação elástica que é proporcionada pelo material em avaliação.

A fase de descarregamento de um ciclo do ensaio dinâmico - com duração em torno de 1 ms, apenas - representa somente o período de tempo em que a madeira ainda está em contato com o endentador no movimento reverso de recuperação elástica. Não representa o final da fase de recuperação do material, que continua, mesmo após a finalização completa do ensaio de endentação dinâmica. Por essa razão, no teste de dureza Brinell em madeira, realizado segundo procedimento da norma europeia EN1534, recomenda-se aguardar um período de três minutos desde a remoção da carga até a medição da endentação. Durante este período de tempo espera-se que o processo de recuperação do material se estabilize de modo a não comprometer a tarefa de mensuração da endentação (HERÄJÄRVI, 2004).

No ensaio de endentação dinâmica foram observadas altas taxas de recuperação elástica, principalmente para as primeiras endentações, que promovem

os maiores níveis de deformação no material. Na Figura 1.5, onde se comparam as taxas de recuperação de uma amostra de madeira da espécie *Hymenaea courbaril* e uma amostra de painel MDP com espessura de 15 mm, observam-se taxas de recuperação iniciais de $4,28 \text{ mm s}^{-1}$ e $5,67 \text{ mm s}^{-1}$, respectivamente para madeira e painel MDP. Nos ciclos seguintes, a taxa de recuperação diminui gradualmente para os dois materiais.

Figura 1.5 - Taxa de recuperação elástica de 5 ciclos do ensaio dinâmico realizado em madeira e em painel MDP



Diferentemente dos ensaios estáticos, onde a força que promove o deslocamento do endentador é controlada pelo equipamento durante todo o processo de endentação, no ensaio dinâmico o endentador se encontra livre, tendo seus movimentos regidos, ora pela força da gravidade, ora pela força de reação do material (VASAUSKAS, 2002). Desta forma, a única característica do ensaio dinâmico que é constante para todos os ensaios, além da massa e geometria do endentador, é a altura inicial da queda livre.

Após o primeiro ciclo, as alturas de queda livre serão diferentes para cada ciclo, assim como os tempos em que estes ocorrerão. Além dessas condições, que não podem ser garantidas para todos os ciclos do ensaio dinâmico, o próprio material em avaliação está sofrendo um processo contínuo de deformações plásticas e elásticas no decorrer do ensaio, que também serão diferentes para cada

ciclo sucessivo de endentação. A dureza dinâmica por exemplo, que tem o seu valor dependente velocidade de aplicação da carga (DUBOVSKÝ; ROHANOVÁ, 2007), não será igual em todos os ciclos do ensaio, não só pelo fato de ser empreendida a partir de velocidades diferentes, mas também pelo fato que será mensurada a partir de deformações iniciais distintas. Este fato foi observado nos ensaios realizados neste estudo, tanto para as madeiras quanto para os painéis MDP.

Apesar do ensaio dinâmico não permitir a aplicação das mesmas condições de contorno para cada um de seus ciclos, todas as variações das características destes ciclos são fruto das propriedades físico-mecânicas do material e podem ser úteis para predição destas propriedades, como será demonstrado a seguir.

1.3.3 Predição de propriedades com uso de regressão linear simples

A partir de regressões lineares simples, todos os parâmetros observados no ensaio dinâmico foram associados individualmente com as propriedades físico-mecânicas das madeiras e dos painéis MDP. Os parâmetros força máxima (F_{maxC1}), taxa de carregamento (T_{C1}) e altura de recuperação (s_{r1}) do primeiro carregamento e a força máxima do segundo carregamento (F_{maxC2}) apresentaram correlações de moderada para forte com as propriedades densidade, resistência à compressão paralela, módulo de elasticidade e o módulo de ruptura à flexão estática da madeira serrada. Nenhum parâmetro característico do ensaio dinâmico apresentou boa correlação com a resistência à tração perpendicular dos painéis MDP; a melhor das correlações foi obtida com a força média do primeiro descarregamento (F_{medD1}).

As regressões lineares simples que melhor inferiram propriedades físico-mecânicas a partir de parâmetros característicos dos ensaios de endentação dinâmica são apresentadas na Tabela 1.4. Em alguns casos, outros parâmetros característicos do ensaio dinâmico poderiam ser selecionados, obtendo-se coeficientes de determinação semelhantes para as regressões. Como exemplo, pode citar-se o MOR da madeira serrada, inferido a partir de parâmetros do primeiro ciclo, como a F_{maxC1} ($R^2 = 0,68$) e a T_{C1} ($R^2 = 0,69$).

Tabela 1.4– Regressões lineares para predição de propriedades físico-mecânicas da madeira serrada e de painéis MDP a partir de parâmetros característicos dos ensaios de endentação dinâmica

Material	Propriedade	Regressão linear	R ²
Madeira	D	$D = 0,378.F_{maxC1} + 41,65$	0,96
	f_{c0}	$f_{c0} = 0,031.T_{C1} + 11,82$	0,83
	MOE	$MOE = 515,9.s_{r1} + 1294$	0,78
	MOR	$MOR = 0,123.F_{maxC2} - 0,347$	0,70
Painel MDP	RTP	$RTP = -0,008.F_{medD1} + 10,12$	0,23

De um modo geral, os parâmetros obtidos a partir do segundo ciclo do ensaio dinâmico não apresentaram correlações significativamente melhores com as propriedades físico-mecânicas da madeira, se comparados com os parâmetros obtidos no primeiro ciclo. Exceções a este princípio ocorreram para o fator de recuperação (f_{re}) e suas associações com o MOE e o MOR da madeira e para a força máxima de carregamento (F_{maxC}) e suas associações com f_{c0} , MOE e MOR. Nesses casos, as regressões com uso desses parâmetros evidenciaram um pequeno e gradual acréscimo no coeficiente de determinação quando o parâmetro é extraído a partir do segundo ciclo do ensaio (Tabela 1.5). Nas associações entre f_{re} e as propriedades MOE e MOR se observava uma estabilização na evolução do coeficiente de determinação quando o parâmetro é extraído a partir do quinto ciclo do ensaio.

Tabela 1.5 - Coeficientes de determinação (R²) das regressões lineares para predição de propriedades a partir de parâmetros obtidos nos vários ciclos do ensaio dinâmico

Propriedade	Parâmetro	Ciclo do ensaio dinâmico no qual o parâmetro foi obtido					
		1	2	3	4	5	6
D	f_{re}	-	0,80	0,74	0,74	0,79	0,77
f_{c0}		-	0,75	0,72	0,70	0,70	0,72
MOE		-	0,65	0,61	0,65	0,73	0,74
MOR		-	0,53	0,54	0,57	0,60	0,59
D	F_{maxC}	0,96	0,90	0,81	0,74	0,63	0,54
f_{c0}		0,81	0,83	0,83	0,78	0,74	0,64
MOE		0,64	0,71	0,66	0,61	0,55	0,49
MOR		0,68	0,70	0,57	0,47	0,39	0,34

A dureza dinâmica apresentou acentuada correlação com as forças médias (F_{medC}) e máximas (F_{maxC}) e com a taxa de carregamento (T_C), principalmente nos primeiros ciclos do ensaio (Tabela 1.6). De fato, estes parâmetros são proporcionais e interdependentes; para materiais de dureza elevada, por exemplo, onde se observam maiores taxas de carregamento, também se obtêm maiores forças de carregamento.

Tabela 1.6 - Correlação linear de Pearson (R) entre a dureza dinâmica HD e os parâmetros F_{medC} , F_{maxC} e T_C

Parâmetro1	Parâmetro 2	Ciclo do ensaio dinâmico no qual o parâmetro 2 foi obtido					
		1	2	3	4	5	6
HD	F_{medC}	0,99	0,95	0,94	0,96	0,74	0,75
	F_{maxC}	0,98	0,92	0,90	0,95	0,70	0,71
	T_C	1,00	0,99	0,99	1,00	0,94	0,97

Considerando os primeiros ciclos do ensaio dinâmico, tanto a dureza dinâmica quanto a taxa e as força de carregamento poderiam ser considerados parâmetros análogos, podendo expressar, de um modo geral, a resistência que o material oferece à endentação. As propriedades D , f_{c0} e MOR da madeira, por exemplo, que foram expressas em função dos parâmetros F_{maxC} e T_C do ensaio dinâmico (Tabela 1.4), também poderiam ser expressas em função de HD .

1.3.4 Predição de propriedades com uso de regressão múltipla

A partir do método estatístico *Stepwise* foi possível selecionar modelos de regressão múltipla relativamente simples, utilizando de quatro a oito parâmetros do ensaio de endentação dinâmica ($4 \leq p \leq 8$), com bons coeficientes de determinação e valores reduzidos de erro de predição. A Tabela 1.7 apresenta o resultado da etapa de calibração e os modelos de regressão múltipla estimados. A densidade da madeira foi associada com parâmetros até do quarto ciclo do ensaio dinâmico; as propriedades MOE e MOE empregaram parâmetros até do quinto ciclo e a propriedade f_{c0} da madeira e RTP dos painéis MDP foram associadas a parâmetros até do sexto ciclo.

Tabela 1.7 - Performance dos modelos de regressão múltipla estimados (etapa de calibração) para predição das propriedades físico-mecânicas da madeira e de painéis MDP

Material	Propriedades	Modelos estimados	R^2_{cal}	RMSEC
Madeira	D (kg m^{-3})	$D = 577,7 - 567,5.h_{abs4} + 813,9.S_{re2} + 0,496.F_{medC3} + 424,7.\delta_3$	0,98	22,57
	f_{c0} (MPa)	$f_{c0} = 16,69 + 416,6.h_6 - 68,81.S_{r5} + 0,045.F_{medD1} + 0,06.F_{medC2} - 0,395.b_6$	0,94	5,97
	MOE (MPa)	$MOE = 4300 - 49406.h_3 + 53583.h_5 + 546,82.S_{r5} - 1,46.T_{D5} + 6638.\delta_5 + 0,9.R_{fd1-2}$	0,91	1459
	MOR (MPa)	$MOR = 151,7 - 65,96.t_{C3} + 0,461.F_{medC2} + 0,416.F_{medD4} - 0,934.F_{medC4} - 0,0317.T_{D5}$	0,88	14,63
Painel MDP	RTP (MPa)	$RTP = -16,82 + 0,064.HD_4 + 1,54.S_{04} + 0,46.t_{C4} - 0,00071.T_{C5} + 56,02.\delta_1 - 0,77.\delta_6 - 6,60.b_1 - 0,016.E_{nom}$	0,84	0,021

RMSEC expresso na mesma unidade da propriedade

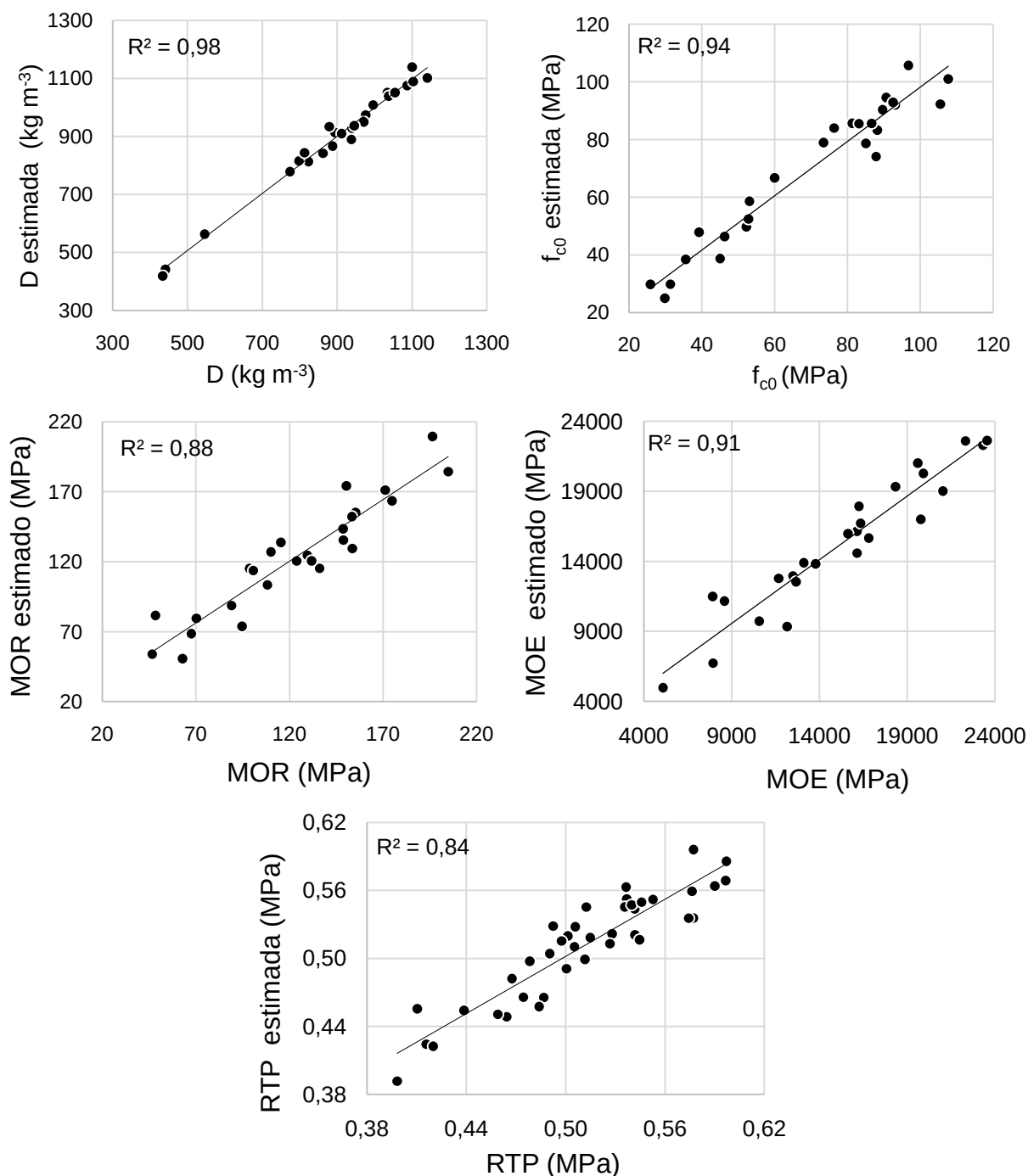
E_{nom} é a espessura nominal do painel, único parâmetro não lido diretamente pelo durômetro

Conforme já apresentado (Tabela 1.4), a propriedade RTP dos painéis MDP não pode ser inferida satisfatoriamente a partir de regressão simples com uso de um único parâmetro característico do ensaio dinâmico. Nesta nova situação, usando regressão múltipla verifica-se que o modelo ajustado obteve boa performance, apresentando $R^2 = 0,84$ e RMSE de 0,021 MPa.

Por questões econômicas, as indústrias de painéis buscam, frequentemente, a minimização do teor de resina, tornando a RTP uma das propriedades mais sensíveis do processo produtivo. Também denominada “ligação interna”, a RTP avalia a qualidade da colagem das partículas, especialmente na camada interna do painel e é sensivelmente sujeita às mudanças da duração, temperatura e pressão de prensagem, fator de compactação e umidade das partículas (Kelly, 1977), especialmente quando se opera com teores reduzidos de resina. Cook et al. (1997) utilizaram modelo preditivo baseado em redes neurais para estimar dinamicamente a RTP dos painéis MDP a partir das variáveis do processo produtivo, obtendo RMSE de previsão de 12,5%. Considerando os valores da RTP dos painéis empregados no programa experimental deste estudo, que apresentaram variação de 0,39 a 0,60 MPa, o RMSE percentual, obtido a partir do ensaio de endentação dinâmica foi de 10,34%, um valor próximo ao encontrado em Cook et al. (1997).

A Figura 1.6 apresenta as associações entre valores obtidos por ensaios convencionais e valores estimados, na etapa de calibração dos modelos de regressão múltipla.

Figura 1.6 - Associação de valores mensurados e estimados das propriedades D , f_{c0} , MOR e MOE



Observa-se baixa dispersão de resultados em todo o domínio da função que estima a densidade ($434 \text{ kg m}^{-3} \leq D \leq 1141 \text{ kg m}^{-3}$) e alguns poucos resultados dispersos nas função de predição do MOE. Nesta última, apenas um resultado tem

desvio 1,5 vezes maior que o alcance interquartil dos resíduos, onde foi predito um MOE de 11486 MPa para um valor mensurado de 7930 MPa.

A análise de variância entre os modelos de regressão linear simples e os múltiplos (teste F) demonstrou que existe diferença significativamente entre eles para todas as propriedades preditas (p de significância $< 0,05$).

Apesar de utilizar parâmetros dos 6 ciclos do ensaio dinâmico para todas as associações realizadas por meio de regressão múltipla, apenas as propriedades f_{co} da madeira e RTP dos painéis tiveram parâmetros do sexto ciclo empregados em seus modelos de inferência. Isso demonstra que para as outras propriedades não seria relevante o uso dos parâmetros a partir do sexto ciclo do ensaio.

Na Tabela 1.8 são comparadas as performances (R^2 e RMSE) de associações realizadas com parâmetros obtidos com quantidades crescentes de ciclos (1 – somente parâmetros do primeiro ciclo; 2 – parâmetros do primeiro e segundo ciclo; 3 – do primeiro ao terceiro ciclo; ...) nas etapas de calibração e validação. O número de variáveis empregadas em cada modelo foi mantido constante para garantir isonomia nas comparações. Foram utilizadas quatro variáveis para o modelo de densidade, cinco variáveis para f_{co} e MOR, seis variáveis para o MOE e oito variáveis para a RTP dos painéis MDP. Este número de variáveis foi o mesmo utilizado nas associações realizadas anteriormente com todos os parâmetros do ensaio dinâmico (Tabela 1.7).

No geral, observou-se que aumentando o número de ciclos obtêm-se melhores associações, o que pode ser visto por meio dos coeficientes de determinação e dos níveis de RMSE da Tabela 1.8; contudo, não se observam diferenças significativas entre os resultados obtidos com 5 e 6 ciclos do ensaio dinâmico.

A partir de quatro ciclos, o método *Stepwise* manteve o modelo de inferência da densidade da madeira inalterado, demonstrando que para esta propriedade os parâmetros a partir do quinto ciclo são irrelevantes.

Tabela 1.8 - Resultado de associações realizadas com parâmetros de diferentes quantidades de ciclos do ensaio de endentação dinâmica

Propriedade	Ciclos	R ² _{cal}	RMSEC	R ² _{val}	RMSECV
D (kg m ⁻³)	1	0,96	35,30	0,95	45,56
	2	0,97	29,04	0,96	39,44
	3	0,97	29,04	0,96	39,42
	4	0,98	22,57	0,98	27,82
	5	0,98	22,57	0,98	28,27
	6	0,98	22,57	0,98	28,19
f _{c0} (MPa)	1	0,82	10,54	0,77	13,11
	2	0,86	9,16	0,85	11,46
	3	0,90	7,80	0,91	10,38
	4	0,93	6,35	0,91	8,43
	5	0,95	5,29	0,94	6,80
	6	0,94	5,97	0,91	7,36
MOE (MPa)	1	0,83	2028	0,68	3390
	2	0,84	1930	0,72	3209
	3	0,87	1761	0,79	2648
	4	0,89	1616	0,85	2198
	5	0,91	1449	0,88	2017
	6	0,91	1459	0,87	1995
MOR (MPa)	1	0,72	22,42	0,65	27,37
	2	0,75	21,40	0,65	21,98
	3	0,76	20,88	0,70	26,07
	4	0,81	18,44	0,75	23,60
	5	0,88	14,92	0,85	19,72
	6	0,88	14,63	0,85	19,75
RTP (MPa)	1	0,72	0,026	0,63	0,033
	2	0,73	0,026	0,63	0,034
	3	0,78	0,023	0,63	0,033
	4	0,84	0,021	0,77	0,024
	5	0,84	0,020	0,78	0,026
	6	0,84	0,021	0,75	0,026

Todos os modelos de inferência das propriedades das madeiras apresentaram boa performance na etapa de validação com baixos valores de RMSE e coeficientes de determinação na faixa de 0,85 a 0,98.

A validação do modelo de inferência da propriedade RTP teve performance moderada em seu coeficiente de determinação ($R^2_{\text{val}} = 0,75$), mas ainda sim apresentou um nível baixo de RMSE (0,026 MPa).

1.4 CONCLUSÕES

As propriedades densidade, resistência à compressão paralela, módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática da madeira serrada e resistência à tração perpendicular de painéis MDP puderam ser inferidas a partir parâmetros característicos selecionados do ensaio de endentação dinâmica. Os modelos de associação entre valores obtidos convencionalmente e inferidos pelo ensaio de endentação dinâmica apresentaram bons coeficientes de determinação ($0,84 \leq R^2 \leq 0,98$) e reduzidos erros de estimativa. Estas predições foram realizadas por meio de modelos de regressão múltipla utilizando de 4 a 8 parâmetros obtidos de até 6 ciclos do ensaio de endentação dinâmica.

As associações realizadas a partir de parâmetros obtidos apenas do primeiro ciclo do ensaio dinâmico também apresentaram boa performance na predição das propriedades da madeira e dos painéis MDP ($0,72 \leq R^2 \leq 0,96$) porém, aumentando-se o número de ciclos em até 5, se obtêm modelos de inferência mais precisos. A adição de parâmetros do sexto ciclo do ensaio não proporcionou melhora significativa na predição das propriedades da madeira e dos painéis MDP.

O ensaio de endentação dinâmica demonstrou ter grande potencial como método alternativo para predição das principais propriedades físico-mecânicas da madeira e de painéis MDP. Além de possibilitar a inferência de diversas propriedades a partir de um único teste de procedimento simples e expedito, mostrou particular potencial para simplificar a obtenção da resistência à tração perpendicular de painéis MDP, que é de determinação convencional trabalhosa.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, R. P. Sinais digitais de um durômetro portátil para a estimativa de propriedades de madeiras para dormentes. 2015. ix, 86 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/136724>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM D1037-78: Hardness Modulus Test - Number of Penetrations, 234, 1987.
- ASSIS, A. A. Desenvolvimento de um durômetro portátil para madeiras com o uso de transdutor de deslocamento. 2015. ix, 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/131951>.
- ASSIS, A., ALEXANDRE, R., BALLARIN, A. Dynamic hardness of wood – measurements with an automated portable hardness tester. *Holzforschung*, v. 71, n. 5, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190:Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013 b. 44p.
- 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. et al. Portable hardness tester for timber classification. In: WCTE 2010-World Conference on Timber Engineering. 2010. p. 20-24.
- BESLIU, S.; GHEORGHE, G. U. T. T.; AMARIEI, S. Contributions to a method and a new technique for determination of some important mechanical properties of massive wood texture. *Food and Environment Safety Journal*, v. 14, n. 1, 2015.
- COLENCI, R. A. Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário. 2006. iii, 83 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/101773>.
- COOK, D. F.; CHIU, C. Predicting the internal bond strength of particleboard, utilizing a radial basis function neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 10, n. 2, p. 171-177, 1997.

- DOYLE, J. The hardness of wood. Ph.D.- Thesis, University of Canterbury, Christchurch, N.Z. 1980.
- DUBOVSKÝ, J.; ROHANOVÁ, 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.
- 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.
- 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, H. 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.
- HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 58, n. 1-2, p.91-95, 2000.
- KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977.
- 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.
- LEHMANN, W. F. Simplified test of internal bond in particleboard. *Forest Products Journal*, v. 15, n. 5, p. 223-224, 1965.
- 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.
- 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

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009. 493 p.

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.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

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.

SZILÁGYI, K. Rebound surface hardness and related properties of concrete. 2013.

TABOR D. The Hardness of Metals“, Oxford Univ. Press, London, 1951.

TODHUNTER, I. A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials. Cambridge University Press, 2014.

VASAUSKAS, V. Dynamic hardness during different phases of indentation. VDI BERICHTE, v. 1685, p. 359-364, 2002.

WALLEY, S. M. Historical origins of indentation hardness testing. Materials Science and Technology, v. 28, n. 9-10, p. 1028-1044, 2012.

CAPÍTULO 2

PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS MDP POR MEIO DO ENSAIO DE ENDENTAÇÃO DINÂMICA

RESUMO

Este trabalho investigou o uso de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica para predição de propriedades físico-mecânicas de painéis de partículas de madeira de média densidade (MDP). No programa experimental foram estudados 40 painéis convencionais de três camadas e 10 painéis de alta performance (HPP), com espessuras variando de 7 a 25 milímetros. Foram obtidos modelos de regressão múltipla a partir de 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica. A capacidade de generalização dos modelos foi avaliada por meio de validação cruzada *k-fold*. Os resultados de calibração revelaram bons coeficientes de determinação na predição de cinco propriedades de MDP ($0,84 \leq R^2 \leq 0,89$) e sete propriedades de HPP ($0,78 \leq R^2 \leq 0,98$). Os modelos validados apresentaram robustez e eficácia para predição da resistência à tração paralela, módulo de elasticidade e densidade das duas categorias de painéis; resistências ao arrancamento de parafuso no topo e na face dos painéis convencionais e, também, do módulo de ruptura dos painéis de alta performance. O ensaio de endentação dinâmica demonstrou ter grande potencial como método alternativo para predição de propriedades físico-mecânicas dos painéis de madeira reconstituída, considerando a sua praticidade e a boa performance obtida na predição destas propriedades.

Palavras-chave: PAINEL de madeira reconstituída. Endentação dinâmica. Dureza dinâmica. Propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the use of the dynamic indentation test for the inference of physical-mechanical properties of particleboards. The experimental program employed 40 three-layer standard particleboards and 10 high-performance particleboards, with thickness ranging from 7 to 25 millimeters. Multiple regression models were calibrated using 144 characteristics of the dynamic indentation test. The models were evaluated by means of k-fold cross validation method. The calibration tests revealed good coefficients of determination in the estimation of five properties of standard particleboards ($0.84 \leq R^2 \leq 0.89$) and seven properties of high-performance particleboards ($0.78 \leq R^2 \leq 0.98$). The validation of the models showed robustness and effectiveness to predict internal bonding, modulus of elasticity, density for both grades of particleboards and also, face and edge screw withdrawal resistances just for standard particleboard and the modulus of rupture of the high-performance particleboard. The dynamic indentation test revealed to be useful as an alternative method for estimating physical-mechanical properties of particleboards, taking into account its easy-use and good performance to estimate the properties of the panel.

Keywords: Particleboard. Dynamic indentation. Dynamic hardness. Physical-mechanical properties.

2.1 INTRODUÇÃO

A qualidade dos painéis de partículas de madeira de média densidade (MDP). depende das matérias-primas utilizadas (madeira, adesivo e aditivos) e das variáveis empregadas durante o processo produtivo, como geometria e umidade das partículas, teor de adesivo, pressão, temperatura e tempo de prensagem e razão de compactação (KELLY, 1977; BODIG; JAYNE, 1982; BOUZAKIS; KOUTOUPAS, 2003).

A avaliação da qualidade é usualmente conduzida com ensaios físico-mecânicos, cujos resultados, em alguns casos, têm a importante e premente função de retroalimentar o processo produtivo. No geral, estes ensaios têm protocolos rígidos no tocante ao preparo e condicionamento das amostras e na metodologia. É o caso do ensaio de resistência à tração perpendicular (RTP), que exige utilização de máquina de universal de ensaios, emprego de suportes metálicos colados à amostra, além de tempo para acondicioná-la e testá-la (LEHMANN, 1965).

Por este motivo, diversas pesquisas buscam ensaios que promovam maior simplicidade e, sobretudo, agilidade na avaliação da RTP. Algumas sugerem o uso de métodos e equipamentos alternativos para medição de propriedade não convencional que tenha boa correlação com a RTP, como é o caso da resistência ao cisalhamento paralelo à superfície (WANG et al., 1988); outras avaliam o uso de ensaios não destrutivos para predição da RTP como, por exemplo, a velocidade de propagação de ondas de ultrassom (SUN; ARIMA, 1999); ainda outras, propõem a estimativa da RTP por meio de outro ensaio convencional de mais fácil aplicação, como o ensaio de resistência ao arrancamento de parafuso (SEMPLE, SMITH, 2005).

Para além do ensaio de RTP, pesquisas também buscam métodos mais simples para a avaliação de outras propriedades físico-mecânicas do MDP como, por exemplo, o uso da densidade para predição do inchamento em espessura (CAI et al., 2004) ou para predição do MOE e MOR (IWAKARI et al., 2008) ou, ainda, a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) pela técnica de excitação por impulso (ASTM, 2007), como proposto por Vilela et al. (2016). Independente dos

métodos utilizados busca-se, principalmente, facilitar o processo de avaliação de qualidade dos painéis e, conseqüentemente, a prática rotineira das indústrias.

A dureza tem destaque dentre os ensaios não destrutivos para madeira, por se tratar de um ensaio simples e com resultados bem correlacionados com outras propriedades mecânicas importantes do material (IBAMA 1993; HIRATA 2001; COLENCI 2002). Avalia a resistência de um material à penetração (endentação) de um corpo (endentador) de dureza elevada e geometria conhecida. É expressa pela razão entre a força aplicada e a endentação promovida no material (DOYLE; WALKER, 1985).

Mais recentemente, a dureza dinâmica tem sido apresentada como alternativa aos ensaios tradicionais de dureza estática para madeira, pois, além ser um ensaio mais rápido, pode utilizar equipamentos mais simples, com grande potencial de se tornarem portáteis (COLENCI 2006; MEYER et al., 2011; BALLARIN et al., 2012; ASSIS 2015). Estes ensaios normalmente utilizam a queda livre de uma massa para mobilizar a energia de endenta o (AUGUTIS et al., 2005; COLENCI, 2006; MEYER et al., 2011; BALLARIN et al., 2012; ASSIS, 2015); desta forma, a força de reação do material em avaliação é que determina o desenvolvimento da curva de carregamento, a velocidade de recuperação e os movimentos de “ricochete” (repique) que seguem o primeiro impacto (VASAUSKAS, 2002; ALEXANDRE, 2015).

Para metais, já é uma prática comum utilizar as características de reação do material para a avaliação da dureza dinâmica, quer seja pela medição da energia absorvida durante o impacto - teste do escleros pio - ou pela força de reação exercida sobre endentador durante a fase de endentação (VASAUSKAS, 2000). Mais recentemente, Assis (2015) utilizou a força média resultante do impulso da endentação para avaliação da dureza dinâmica de madeiras e obteve forte associação com os resultados do tradicional ensaio de dureza Janka.

As características de reação do material, que são facilmente lidas em um ensaio de endentação dinâmica com o uso de sensores, têm sido utilizadas para estimativa de outras propriedades do material além da própria dureza. Augutis et al. (2005) extraíram seis características distintas do ensaio dinâmico de dureza e reportaram bons resultados na inferência do módulo de elasticidade de compósitos de madeira de baixa densidade (*softboard*). Alexandre (2015) encontrou forte

associação entre propriedades de resistência e rigidez de cinco espécies de eucalipto determinadas convencionalmente e inferidas a partir de 18 parâmetros característicos de um ensaio de dureza dinâmica ($0,71 \leq R^2 \leq 0,98$).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso do ensaio de endentação dinâmica como método para predição de propriedades físico-mecânicas de painéis MDP e painéis de alta performance HPP (do inglês, *high performance particleboard*). Investigou-se a possibilidade de associação de 144 parâmetros característicos extraídos da endentação dinâmica em seus diversos ciclos de endentação (repiques) para predição de 10 propriedades dos painéis de MDP e HPP. O resultado de maior importância tecnológica encontrado foi a obtenção de modelos analíticos de associação das variáveis capturadas do fenômeno com as propriedades tecnológicas dos painéis.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

No programa experimental foram estudados 40 painéis MDP nas espessuras de 12 a 25 mm e 10 painéis HPP com espessura de 7 mm. Todos os painéis, do tipo de três camadas, foram produzidos industrialmente com madeira de eucalipto e resinas melamínica (MUF) e uréia-formaldeído (UF) e prensados em sistema de prensagem contínua com as pressões específicas de 2,84 MPa e 3,24 MPa, respectivamente para MDP e HPP. A Tabela 2.1 apresenta os valores médios dos principais parâmetros de processos empregados na fabricação destes painéis.

Tabela 2.1-Principais parâmetros de processo utilizados na fabricação dos painéis

Categoria de painel	Espessura (mm)	Tempo de prensagem (s)	Temp. de prensagem (°C)	Densidade (kg m ⁻³)	Razão de compactação	Teor de resina %CI / %CE	Tipo de resina
HPP	7	43	196	755	1,75	10 / 10,5	MUF
	12	43	197	640	1,48		
MDP	15	46	198	635	1,47	6,8 / 9	UF
	18	56	198	630	1,46		
	25	87	198	620	1,44		

CI: Camada interna CE: Camada externa

A avaliação convencional do desempenho dos painéis foi conduzida com ensaios físicos e mecânicos em corpos de prova (cp) deles confeccionados, seguindo, no geral, o preconizado na norma NBR 14810-2 (ABNT, 2013). Foi empreendida no laboratório de uma indústria de painéis seguindo o procedimento de amostragem vigente.

Os ensaios convencionais realizados foram: resistência à tração perpendicular (RTP), resistência à tração superficial (RTS), módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática, resistência ao arrancamento de parafuso no topo (RAPT) e na face do painel (RAPF), densidade (D), densidade da superfície (DS) avaliada por meio do ensaio de perfil de densidade, inchamento em espessura (IE2h) e absorção de água (AA2h) após 2 horas de imersão.

Da borda ao longo da largura de cada painel foram extraídas amostras equidistantes para cada ensaio convencional conforme quantidades e dimensões apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Quantidades e dimensões dos cps utilizados nos ensaios convencionais

Ensaio	Quantidade	Dimensão (mm)
RTP	9	50 x 50
RTS	3	74 x 74
MOE e MOR	6	50 x 20e* + 50
RAPT	3	72 x 72
RAPF	3	72 x 72
D	15	120 x 120
DS	9	50 x 50
IE2h e AA2h	8	25 x 25

* 20 vezes a espessura do painel

Os ensaios de endentação dinâmica foram realizados, quando possível, nos mesmos cps utilizados nos ensaios convencionais. Este procedimento foi empregado para os cps de RTS, MOE, MOR, RAPT, RAPF, D e DS. Para os testes RTP, IE2h e AA2h, cujos cps são inutilizados após a sua realização, foram utilizados outros cps com dimensão de (50 x 50) mm², amostrados de posições adjacentes do painel de onde haviam sido obtidos os cps dos ensaios convencionais.

Os ensaios de endentação dinâmica foram realizados com um durômetro portátil dotado de transdutor de deslocamento e processador embarcado, apresentado em detalhes em Assis (2015). Utiliza-se de endentador esférico de 10 mm de diâmetro e energia de endentação de 1,96 J, obtida pela combinação da elevação de uma massa de 1 kg a uma altura de 200 mm.

Com o durômetro portátil foi possível registrar o sinal de deslocamento do endentador por um período de 694 ms a uma taxa de 10 kHz e assim avaliar os seis primeiros ciclos de cada ensaio. Estudos preliminares evidenciaram que em painéis de MDP é comum se observar até 18 ciclos para dissipação completa da energia, o que ocorre em torno de 900 ms.

Os sinais de deslocamento registrados pelo durômetro portátil foram processados no *Wood Indentation Analyzer*⁴ (WIA), programa computacional desenvolvido especificamente para este fim. Além de aplicar filtros no sinal original de deslocamento e realizar a derivação deste sinal em velocidade e, posteriormente, em aceleração, o WIA foi responsável por aplicar os algoritmos para extração dos parâmetros característicos selecionados e mensurados diretamente (deslocamentos, velocidades, acelerações e tempo) e dos parâmetros calculados indiretamente como, por exemplo, as forças - obtidas pelo produto da massa do endentador por sua aceleração. Todos os parâmetros obtidos direta e indiretamente dos sinais digitais foram selecionados a partir de ensaios piloto.

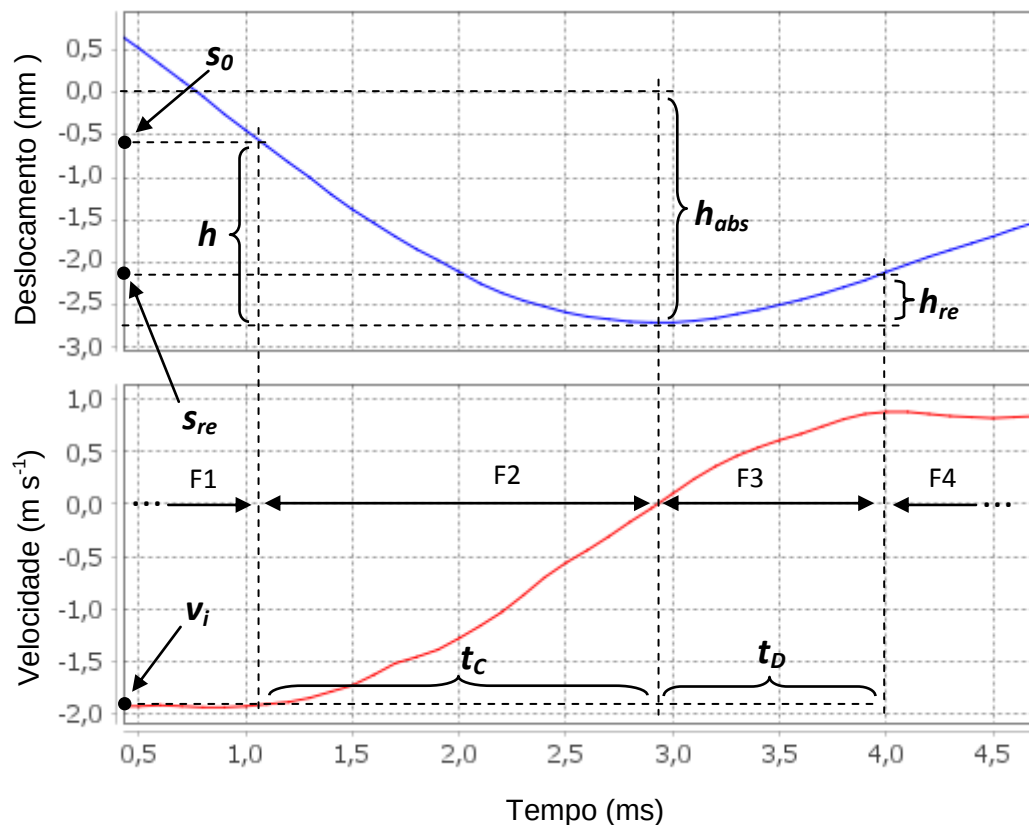
Ensaio de endentação dinâmica com mobilização de energia por queda livre de massa promovem endentações complementares à do primeiro impacto - primeiro ciclo - devido ao ricochete do endentador. Um ciclo do ensaio de dinâmico corresponde ao período de tempo que compreende as suas fases de queda livre (F1), carregamento (F2), descarregamento (F3) e movimento livre de retorno do endentador (F4). A endentação, propriamente dita, se refere à fase de carregamento, somente.

Os instantes em que ocorrem as mudanças das fases de cada ciclo do ensaio dinâmico foram identificados a partir da análise de seus sinais de velocidade e de deslocamento. Para o primeiro ciclo, por exemplo, a fase de carregamento inicia-se no instante em que o deslocamento é igual a zero (endentalor toca a madeira); já

⁴ Patente requerida

para o segundo ciclo, esse instante é identificado quando velocidade atinge seu valor máximo negativo, proporcionado pelo movimento de queda livre (v_i - Figura 2.1). Quando a profundidade de endentação atinge o valor máximo (h), ocasião em que a velocidade é igual a zero, inicia-se a fase de recuperação elástica ou descarregamento (F3 - Figura 2.1), isto é, fase em que o endentador é acelerado no movimento reverso até perder o contato com a madeira. Neste instante, que é detectado quando a velocidade atinge seu valor máximo positivo, inicia-se a fase de movimento livre de retorno do endentador, ocasião em que é mensurado o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}).

Figura 2.1 - Exemplo de identificação das fases do ensaio dinâmico a partir de seus sinais de deslocamento e velocidade



O ensaio de endentação dinâmica foi analisado a partir de parâmetros característicos de cada fase de seus ciclos e, também, a partir de parâmetros representativos do ensaio completo. Ainda, alguns parâmetros cogitados inicialmente (ensaio piloto) para análise acabaram, por fim, removidos, por serem altamente correlacionados a outros. Como exemplo citam-se a altura inicial e o tempo total de queda livre ou, ainda, a energia potencial inicial e a energia cinética

no início do carregamento. Todos os parâmetros da fase de queda livre foram resumidos exclusivamente à velocidade inicial de carregamento - v_i .

Os parâmetros selecionados e obtidos de cada fase foram:

Fase de queda livre: velocidade inicial da fase de carregamento (v_i).

Fase de carregamento: dureza dinâmica (HD), profundidade efetiva (h) e absoluta (h_{abs}) de endentação, deslocamento inicial de endentação (s_0), tempo de endentação (t_c), força média (F_{medC}) e máxima (F_{maxC}) de carregamento, taxa de carregamento (T_C) e relação força-deslocamento em 5 segmentos da endentação ($R_{fd1..5}$).

Fase de descarregamento: deslocamento de recuperação elástica (h_{re}), deslocamento final de recuperação (s_{re}), tempo de recuperação elástica (t_{re}), força média (F_{medD}) de descarregamento, taxa de descarregamento (T_D), fator (f_{re}) e taxa (T_{re}) de recuperação elástica.

Fase de movimento livre de retorno: deslocamento de recuperação (s_r), taxa de decremento parcial (δ) e fator de amortecimento (b).

Os parâmetros relacionados com o ensaio completo foram o fator de amortecimento total (b_t) e taxa de decremento total (δ_t).

A dureza dinâmica foi calculada a partir da Eq. 2.1 (ASSIS et al., 2017), onde HD é a dureza dinâmica (MPa), F é a força média resultante do impulso da endentação (N), D é o diâmetro do endentador (mm), h é a profundidade de endentação (mm), m é a massa do endentador (kg), Δv é a variação da velocidade durante a endentação ($m\ s^{-1}$) e Δt é o tempo de endentação (s).

$$HD = \frac{F}{\pi D h} = \frac{m \frac{\Delta v}{\Delta t}}{\pi D h} \quad (2.1)$$

As taxas de decremento parcial (δ) e total (δ_t), que expressam o decremento logarítmico do amortecimento observado nos ciclos do ensaio dinâmico, foram calculadas a partir da Equação geral 2.2, onde δ é a taxa de decremento logarítmico, A_i é a altura inicial de queda livre (mm), s_r é o deslocamento de recuperação (mm) e n é o número de ciclos analisados. A taxa de decremento total utiliza a altura inicial do ensaio (200 mm) e o deslocamento de recuperação do sexto ciclo.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_i}{s_r}\right) \quad (2.2)$$

O fator de amortecimento foi calculado com a Eq. 2.3, onde b é o fator de amortecimento (kg s^{-1}), m é a massa do endentador (kg), t é o tempo (s), A_i é a altura inicial de queda livre (mm), e s_r é o deslocamento de recuperação (mm).

$$b = -\frac{2m}{t} \ln \frac{s_r}{A_i} \quad (2.3)$$

As taxas de carregamento e descarregamento (em N mm^{-1}) foram obtidas a partir das razões entre a força máxima (N) e os deslocamentos efetivos empreendidos nas fases de carregamento e descarregamento (mm), respectivamente.

O fator de recuperação elástica expressou a razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) de cada ciclo e a endentação absoluta do primeiro ciclo (h_{abs}), já a taxa de recuperação elástica, dada em mm s^{-1} , foi obtida a partir da razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) e o intervalo de tempo (Δt) decorrido desde o instante em que ocorreu a profundidade máxima de endentação do primeiro ciclo e o instante inicial de carregamento do ciclo em análise. Ao invés de utilizar o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}) para cálculo do fator e taxa de recuperação, se utiliza o deslocamento inicial de endentação (s_0), pois este último, a partir do segundo ciclo, indica a parcela de deformação restituída no material. Por este motivo, tanto o fator quanto a taxa de recuperação elástica foram medidos somente a partir do segundo ciclo do ensaio.

As relações força-deslocamento das frações de tempo da endentação foram calculadas conforme procedimento já adotado anteriormente em Alexandre (2015). O intervalo de tempo de endentação foi dividido em cinco segmentos de mesma duração, sendo o valor médio da razão força-deslocamento calculado para cada um destes segmentos. Essas relações expressam grandezas com a mesma natureza da rigidez do material, ou seja, força para promover um deslocamento unitário.

No total foram obtidos 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica ($22 + 24 \times 5 + 2$), sendo 22 do primeiro ciclo (f_{re} e T_{re} não são calculados neste período), 24 nos próximos cinco ciclos e 2 parâmetros

característicos do ensaio completo (b_t e δ_t). Representados pelo valor médio de cada painel, alguns destes parâmetros foram selecionados e utilizados para predição das propriedades convencionais dos painéis (Tabela 2.2) por meio de regressão múltipla.

Foram testados métodos estatísticos de seleção de parâmetros (variáveis) com o objetivo de obter os modelos de regressão mais simples e com o melhor o desempenho de predição das propriedades convencionais - avaliado principalmente pela raiz do erro quadrático médio RMSE (do inglês, *root mean square error*).

Os métodos testados foram regressão PLS (FERRER et al., 2008) com seleção VIP (do inglês *variable importance in the projection*), regressão LASSO (TIBSHIRANI, 1996) e regressão *Stepwise* (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). O método *Stepwise* foi configurado de duas maneiras distintas: a primeira, denominada *Stepwise A*, foi parametrizada para obter modelo com maximização do coeficiente de determinação (R^2) e minimização do erro de predição, independentemente do número de variáveis preditivas " p "; a segunda, denominada *Stepwise B*, foi parametrizada limitando-se as variáveis " p " em, no máximo, 20 % do número de observações.

Para cada propriedade foram realizadas três associações: a primeira utilizando exclusivamente os resultados (de ensaio convencionais e de ensaios de endentação dinâmica) de painéis MDP - modelo MDP; a segunda, utilizando exclusivamente os resultados de painéis HPP - modelo HPP; a terceira, incluindo os resultados dos dois tipos de painéis - modelo geral. Todas as associações foram submetidas a uma etapa inicial de seleção de variáveis, para posterior ajuste de modelos - calibração - e posterior validação.

O RMSE percentual foi calculado com base na variação máxima dos resultados mensurados para cada uma das propriedades físico-mecânicas (diferença entre o valor mínimo e valor máximo de cada propriedade).

A capacidade de generalização dos modelos obtidos foi verificada pelo método de validação cruzada *k-fold*, utilizando-se 10 repetições com 5 particionamentos (*folds*), ou seja, 80 % das observações foram utilizadas para treinamento do modelo - calibração - e 20% das amostras para a etapa de validação

deste modelo. O resultado final de validação foi dado pela média dos resultados individuais das 10 repetições de cada etapa do algoritmo de validação.

Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do ambiente computacional “R” versão 3.6.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das propriedades físico-mecânicas dos painéis MDP e HPP, obtidas com os ensaios convencionais (Tabela 2.3), evidencia baixos coeficientes de variação (C.V) para a maioria das propriedades, com valores em torno de 1% para algumas propriedades (D e DS). Essa baixa dispersão de resultados pode ser atribuída à homogeneidade característica dos painéis de madeira reconstituída. Segundo Maloney (1993), a baixa variação e possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas dos painéis MDP são algumas de suas vantagens em relação à madeira serrada.

Tabela 2.3 - Estatística descritiva das propriedades físico-mecânicas dos painéis MDP e HPP

Propriedade	MDP				HPP			
	$\bar{X}$	Min	Máx	C.V (%)	$\bar{X}$	Min	Máx	C.V (%)
RTP (MPa)	0,51	0,39	0,60	10,12	1,12	0,93	1,23	7,95
RTS (MPa)	1,41	0,94	1,80	14,56	1,60	1,27	1,83	12,36
MOR (MPa)	15,67	13,68	16,62	6,98	27,82	26,27	28,94	3,02
MOE (MPa)	2820	2489	3071	5,84	4038	3784	4182	3,34
RAPT (kN)	0,86	0,55	1,10	13,06	-	-	-	-
RAPF (kN)	1,16	0,99	1,38	8,54	-	-	-	-
D (kg m ⁻³)	637	615	655	1,59	768	755	779	1,05
DS (kg m ⁻³)	820	781	856	1,60	884	873	898	0,75
IE2h (%)	6,9	4,5	9,1	15,36	1,9	1,6	2,3	10,95
AA2h (%)	22,3	18,8	26,2	8,06	12,6	10,1	15,7	15,37
HD (MPa)	18,6	15,8	23,3	12,19	24,4	22,5	26,9	6,19

RAPT e RAPF realizados somente em painéis com espessuras maiores ou iguais a 12 mm, portanto não aplicáveis para os painéis HPP.

HD: Dureza dinâmica medida pelo durômetro de acordo com a Eq. 2.1

Os painéis HPP têm características muito diferentes dos painéis MDP promovidas, principalmente, pelo alto teor e tipo de resina utilizada e pela maior taxa

de compactação imposta na etapa de prensagem (Tabela 2.1). Essas diferenças garantem melhor performance mecânica e higroscópica, alcançando resistência à tração perpendicular cerca de 1,2 vezes maior que os painéis convencionais MDP e redução em torno 70% no inchamento em espessura (Tabela 2.3). A resistência do painel à endentação, isto é, a sua dureza, também é, propositalmente maior nos painéis HPP (em torno de 40%), tendo em vista que produto é fabricado prioritariamente para aplicação em pisos laminados.

Na Tabela 2.4 comparam-se as performances dos métodos estatísticos de regressão testados preliminarmente para seleção de variáveis na predição da RTP dos painéis MDP e HPP conjuntamente. Apesar do método *Stepwise A* ter apresentado menor RMSE em relação ao método *Stepwise B*, a análise de variância de comparação entre os dois métodos demonstrou que o primeiro não é significativamente diferente do segundo, ao nível de $\alpha = 0,05$ (p de significância = 0,153, teste F).

Tabela 2.4 - Performance dos métodos estatísticos de regressão testados preliminarmente para seleção de variáveis de predição da RTP

	PLS VIP	LASSO	Stepwise A	Stepwise B
R^2	0,95	0,98	0,99	0,98
RMSE (MPa)	0,051	0,034	0,023	0,032
p	99	16	23	5

Assim, todas as associações foram realizadas utilizando-se o método *Stepwise B*, que proporcionou a obtenção de modelos de regressão relativamente simples ($2 \leq p \leq 10$), com bons coeficientes de determinação e valores reduzidos de RMSE de calibração (RMSEC) para a maioria das propriedades (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Desempenho de predição das propriedades físico-mecânicas pelos modelos - etapa de calibração

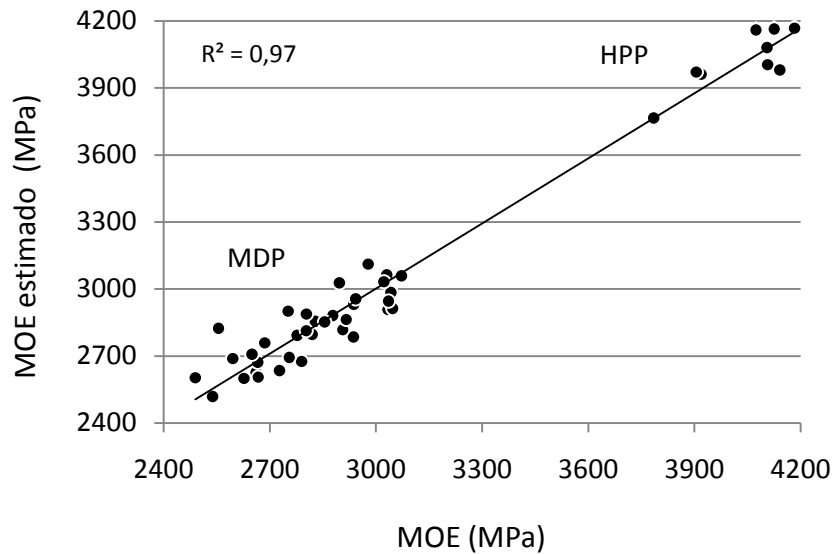
Propriedade	Modelo MDP			Modelo HPP			Modelo Geral		
	R^2_{cal}	RMSEC	p	R^2_{cal}	RMSEC	P	R^2_{cal}	RMSEC	p
RTP (MPa)	0,84	0,021	8	0,85	0,033	2	0,98	0,032	5
RTS (MPa)	0,49	0,14	8	0,86	0,073	2	0,60	0,13	10
MOR (MPa)	0,63	0,65	8	0,91	0,24	2	0,97	0,86	5
MOE (MPa)	0,89	54,21	8	0,93	34,69	2	0,97	86,98	7
RAPT (kN)	0,88	0,038	8	-	-	-	-	-	-
RAPF (kN)	0,86	0,036	6	-	-	-	-	-	-
D (kg m^{-3})	0,89	3,27	4	0,98	1,12	2	0,98	7,70	2
DS (kg m^{-3})	0,55	8,76	8	0,78	3,06	4	0,87	10,58	8
IE2h (%)	0,49	0,75	8	0,65	0,12	2	0,89	0,75	7
AA2h (%)	0,53	1,21	8	0,85	0,72	2	0,84	1,72	4

RMSEC expresso na mesma unidade da propriedade

Foram encontradas correlações de moderadas a fracas para os modelos de associação entre os parâmetros de endentação dinâmica e as propriedades RTS, DS, IE2h e AA2h dos painéis MDP ($0,49 \leq R^2 \leq 0,55$). As demais associações apresentaram correlações de moderadas a fortes ($0,63 \leq R^2 \leq 0,98$).

O modelo geral apresentou maiores coeficientes de determinação se comparado com os modelos específicos. Esse resultado pode ser atribuído às diferenças significativas entre as propriedades do MDP e HPP e o agrupamento destas duas categorias de painéis em uma mesma associação forçado pelo modelo geral. No caso da predição do MOE, por exemplo, os painéis HPP apresentam resultados mais altos e isolados dos resultados dos painéis MDP (Figura 2.2); desta forma, a inclinação da linha de regressão é consistente, mais pelas diferenças entre os conjuntos do que pela sensibilidade do modelo às variações de cada categoria de painéis.

Figura 2.2 - Associação de valores mensurados e estimados para MOE usando o modelo geral

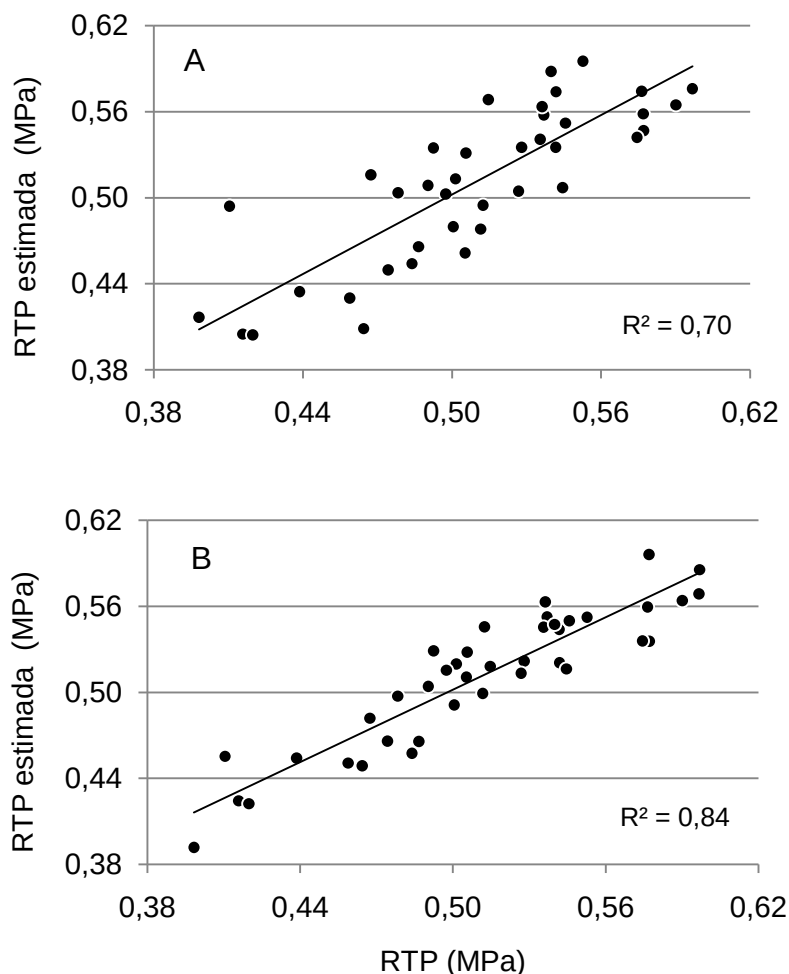


Apesar do favorecimento do coeficiente de determinação, a dispersão observada na Figura 2.2 demonstra um modelo de associação geral coerente, o que pode ser notado pelo valor reduzido de RMSE (86,98 MPa), em cerca de 5% do valor médio observado para MOE.

Os modelos de associação específicos de MDP e HPP apresentaram menores valores de RMSE para a maioria dos casos, o que sugere que o uso destes modelos seja mais apropriado do que o uso do modelo geral.

Na Figura 2.3 são comparadas as associações de predição da propriedade RTP dos painéis MDP, realizadas tanto pelo modelo geral quanto pelo modelo específico.

Figura 2.3 - Associação de valores mensurados e estimados para RTP nos painéis MDP usando o modelo geral (A) e o modelo MDP (B)



Além de apresentar uma melhor correlação entre os valores mensurados e preditos ($R^2 = 0,84$), o modelo específico também apresenta uma redução de 36,3% no valor de RMSE (de 0,032 para 0,021 MPa). As propriedades RTP dos painéis HPP e RTS dos painéis MDP foram os únicos casos em que o modelo geral apresentou melhor performance de predição em relação ao modelo específico (Tabela 2.5). Mesmo para estes casos, as diferenças não são estatisticamente significativas, apresentando uma redução no RMSE de apenas 2,9% para RTP_{HPP} e 7,2%, para RTS_{MDP} .

Neste estudo, a tese inicial era de que as propriedades que são mais relacionadas com a camada externa dos painéis (RTS, DS e MOE) apresentariam melhores predições a partir dos parâmetros do ensaio dinâmico, pois as endentações ocorrem principalmente nesta camada. Já as propriedades mais

relacionadas com a camada interna (RTP, RAPT e RAPS) apresentariam maior dificuldade de predição e, conseqüentemente, modelos com menor performance. Os resultados da Tabela 2.5 contrariam essa tese para os painéis MDP, onde se percebe justamente o contrário; já para os painéis HPP essa relação parece não ter relevância.

A boa correlação entre o ensaio de endentação dinâmica com a RTP demonstra que, mesmo com as endentações rasas (profundidade média de 1,95 mm) promovidas pelo durômetro, os parâmetros de endentação foram sensíveis às características da camada interna do painel, mobilizada no ensaio de RTP. Dentre os parâmetros selecionados para predição da RTP dos painéis MDP (RTP_{MDP}), três são referentes à quarta endentação, sendo estes a dureza dinâmica, a altura inicial de impacto e o tempo de endentação (Eq. 2.4).

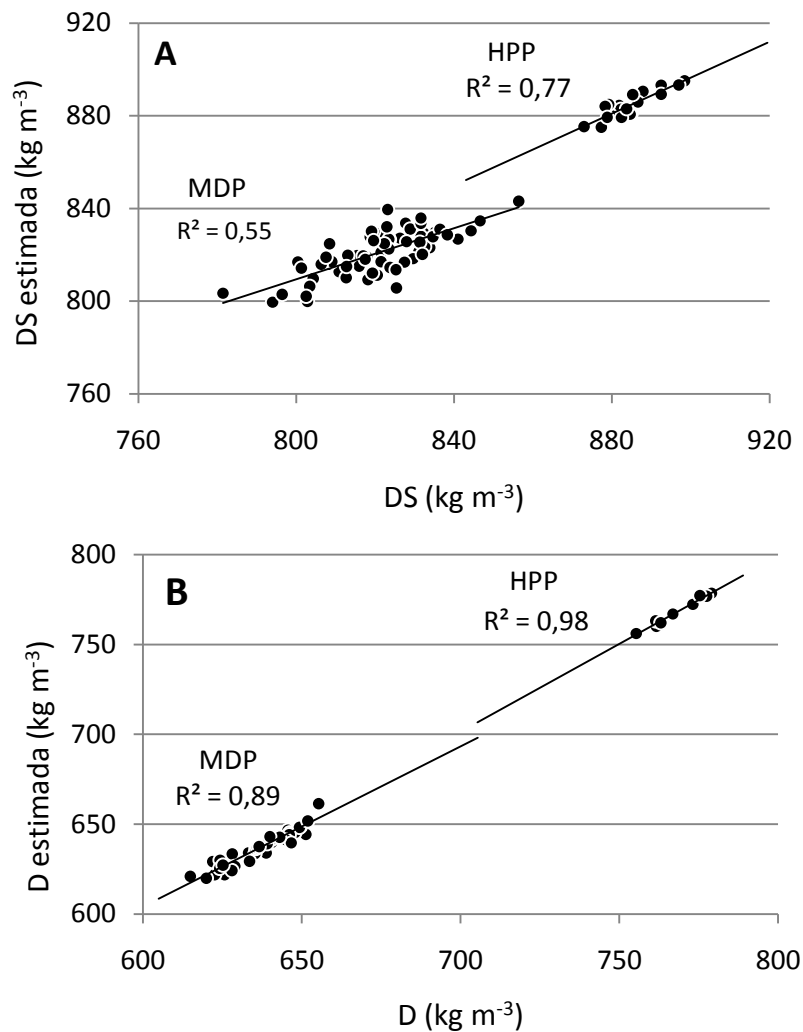
$$RTP_{MDP} = -16,82 + 0,064.HD_4 + 1,54.S_{04} + 0,46.t_{C4} - 0,00071.T_{C5} + 56,02.\delta_1 - 0,77.\delta_6 - 6,60.b_1 - 0,016.E_{nom} \quad (2.4)$$

Onde RTP_{MDP} é a resistência à tração perpendicular dos painéis MDP (MPa), HD é a dureza dinâmica (MPa), s_0 é o deslocamento inicial de carregamento (mm), t_C é o tempo de carregamento (ms), T_C é a taxa de carregamento ($N\ mm^{-1}$), δ é a taxa de decremento parcial (adimensional), b é o fator de amortecimento (adimensional), E_{nom} a espessura nominal (mm) e os números que acompanham as siglas são os ciclos do ensaio dinâmico nos quais os parâmetros foram lidos.

Sugere-se aqui que, após as primeiras endentações, a camada externa já se apresente suficientemente compactada, perdendo a capacidade inicial de amortecimento da endentação. A partir deste momento, a resistência da camada interna poderia ser o fator mais determinante na dinâmica do ensaio de endentação.

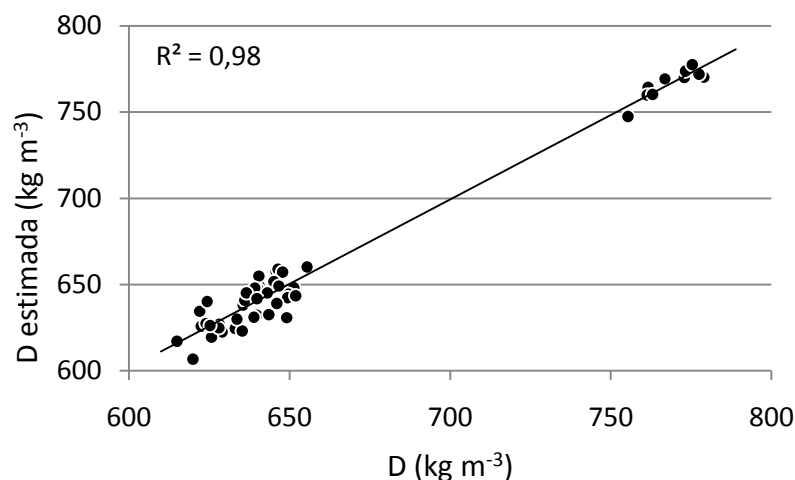
Os modelos específicos da propriedade DS apresentam comportamentos muito diferentes entre as duas categorias de painéis, demonstrando que esta propriedade do painel HPP não é apenas uma extrapolação aproximada do modelo encontrado para os painéis MDP (Figura 2.4-A). Para as outras propriedades, como a densidade, por exemplo, os modelos específicos são semelhantes, quase tendendo a um modelo geral (Figura 2.4-B).

Figura 2.4 - Associação de valores mensurados e preditos para DS (A) e D (B) usando os modelos específicos



Como já mencionado, o uso do modelo específico é preferível ao geral devido à redução dos valores de RMSE que o mesmo proporciona. Essa otimização pode ser percebida com mais clareza ao se comparar os gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 2.4-B e 2.5. Na Figura 2.4-B observa-se menor dispersão de resultados em relação à linha de regressão, principalmente para os painéis MDP, a despeito do coeficiente de determinação mais elevado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Resultado da associação de calibração do modelo geral para predição da densidade



Todas as associações dos modelos específicos de calibração (MDP e HPP) foram submetidas a processo de validação cruzada *k-fold*, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Desempenho dos modelos de predição das propriedades físico-mecânicas - etapa de validação

Propriedade	Modelo MDP			Modelo HPP		
	R^2_{val}	RMSECV	RMSECV (%)	R^2_{val}	RMSECV	RMSECV (%)
RTP (MPa)	0,78	0,026	13,4	0,67	0,049	16,2
RTS (MPa)	0,41	0,17	20,2	0,78	0,093	16,8
MOR (MPa)	0,53	0,82	16,6	0,85	0,32	11,9
MOE (MPa)	0,82	80,17	13,8	0,84	51,59	13,0
RAPT (kN)	0,87	0,040	7,3	-	-	-
RAPF (kN)	0,77	0,047	11,9	-	-	-
D (kg m^{-3})	0,90	3,65	9,0	0,96	1,61	6,8
DS (kg m^{-3})	0,46	10,29	13,7	0,47	4,72	18,5
IE2h (%)	0,30	1,01	22,0	0,39	0,16	25,2
AA2h (%)	0,38	1,59	21,6	0,70	1,01	18,1

RMSECV - RMSE da validação cruzada, expresso na mesma unidade da propriedade

A menor performance de validação ocorreu, evidentemente, para os modelos daquelas propriedades que já haviam apresentado baixa performance de predição na etapa de calibração (Tabela 2.5), a saber IE2h e AA2h, que nesta etapa apresentaram $0,30 \leq R^2 \leq 0,70$ e $18,1 \leq \text{RMSECV } \% \leq 25,2$.

Os melhores resultados ocorreram para as propriedades D, RAPT e RAPF, onde foram obtidos coeficientes de determinação de 0,77 a 0,96 e erros de predição de 6,8 a 11,9 (RMSECV %). Dentre estas destaca-se a densidade, a qual obteve as melhores predições nas duas categorias de painéis (RMSECV de 6,8 a 9%).

Observou-se dificuldade de predição de propriedades de inchamento, como poderia ser esperado. O desempenho nesse ensaio, apesar de condicionado por outras propriedades (como densidade), é avaliado quando o material está na presença de água, condição não avaliada pelo ensaio dinâmico.

Considerando-se como critério de aceitação um coeficiente de determinação maior ou igual a 0,7 e um RMSECV menor ou igual a 15%, os modelos de predição das propriedades RTP, MOE, D, RAPT e RAPF dos painéis MDP e das propriedades MOR, MOE e D dos painéis HPP, se mostraram robustos e passíveis de generalização.

O ensaio de dureza dinâmica despendeu em torno de 5 segundos para sua realização, desde o posicionamento do durômetro sobre o c.p até o final do ensaio. Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de dureza dinâmica, sendo a média destes resultados o valor final que representou a amostra. Desta forma, considerou-se um tempo total de 15 segundos para realização do ensaio dinâmico em cada amostra do painel, ou seja, 3 ensaios de 5 segundos.

A Tabela 2.7 apresenta os tempos médios para realização dos ensaios convencionais empreendidos neste estudo. Os testes mais demorados foram aqueles cuja própria natureza do ensaio exige um tempo longo de exposição a determinadas condições, como é o caso do IE2h e AA2h⁵. A seguir, os ensaios mais demorados foram aqueles que demandam tempo nos protocolos de preparação das amostras (fixação de suportes e tempo para secagem de cola, por exemplo), como é o caso da RTP e RTS.

⁵ Os ensaios de inchamento em espessura e absorção em água também são realizados em imersões de 24 horas conforme preconizado na NBR 14810 (ABNT, 2013).

Tabela 2.7 - Tempo médio (s) para realização dos ensaios convencionais dos painéis

Etapa	RTP	RTS	MOR	MOE	RAPT	RAPF	D	DS	IE2h	AA2h
Medição de dimensões ⁶	19	19	13	13	18	18	17	16	54	52
Fixação de suportes	32	21	-	-	15	15	-	-	-	-
Secagem de cola	600	600	-	-	-	-	-	-	-	-
Limpeza das amostras	20	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaio	26	16	64	64	23	23	-	75	7200	7200
Tempo total	697	664	77	77	56	56	17	91	7254	7252

O ensaio mais expedito é o de densidade, que tem tempo de realização ($\approx 17s$) semelhante ao ensaio de endentação dinâmica. Além de ser um ensaio rápido e prático, a densidade também apresenta influência sobre algumas propriedades físico-mecânicas dos painéis.

Cai et al. (2004) e Iwakari et al. (2008) encontraram alto coeficiente de determinação entre a densidade e o MOE e MOR à flexão dos painéis, porém pouca correlação com a RTP (Tabela 2.8). Correlações moderadas entre a densidade e a RAPF ($R^2 = 0,64$) e o inchamento em espessura após 24 horas de imersão ($R^2 = 0,71$) também foram reportadas em Cai et al. (2004).

Tabela 2.8 - Coeficiente de determinação (R^2) das associações entre a densidade e as propriedades RTP, MOE e MOR de painéis MDP

	Cai et al. (2004)	Iwakari et al. (2008)
RTP	0,40	0,28
MOE	0,83	0,90
MOR	0,61	0,84
RAPF	0,64	-
IE24h	0,71	-

Kelly (1977) demonstrou a partir de outras pesquisas que tanto o MOR quanto o MOE dos painéis MDP, na verdade são dependentes de sua densidade somente para uma mesma razão de compactação (razão entre a densidade final do painel e a densidade da madeira). Para painéis com a mesma densidade, variando-se a

⁶ As tarefas de medição das dimensões dos corpos-de-prova (c.p) foram realizadas em máquina semi-automática de amostragem dimensional (IMAL, modelo IB600)

densidade da madeira e, conseqüentemente, a razão de compactação, observam-se variações correlacionadas tanto no MOE quanto no MOR (Vital et al. 1974 apud Kelly, 1977). O delineamento experimental adotado neste trabalho, que foi condicionado pela rotina de produção industrial, não permitiu avaliar painéis com mesma razão de compactação e distintas densidades, visto que eram muito semelhantes (Tabela 2.1)

De um modo geral, é possível afirmar que a densidade apresenta correlações lineares consistentes com outras propriedades do painel, podendo ser um método alternativo para estimativa destas outras propriedades (CAI et al., 2004). O ensaio de endentação dinâmica, com tempo de realização semelhante ao do ensaio de densidade, mostrou-se um método alternativo promissor para estimativa de algumas outras propriedades dos painéis. Comparando os resultados da Tabela 2.5 com os resultados da Tabela 2.8, observa-se que os modelos obtidos a partir dos ensaios dinâmicos apresentaram boa correlação com as propriedades MOE, MOR dos painéis, semelhantemente como foram as correlações obtidas entre estas e a densidade. Porém, a RTP, que apresentou pouca correlação com a densidade do painel ($R^2 = 0,40$ - Tabela 2.8), obteve boa correlação com o seu valor estimado a partir dos parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica ($R^2 = 0,78$). Uma exceção ocorre para o ensaio de inchamento em espessura, que foi insatisfatoriamente estimado pelo ensaio de endentação dinâmica mas apresenta associação moderada com a densidade (CAI et al., 2004).

2.4 CONCLUSÕES

Com o uso do ensaio de endentação dinâmica e de modelos de regressão relativamente simples ($2 \leq p \leq 10$), foram encontrados bons coeficientes de determinação e valores reduzidos de RMSE para a etapa de calibração na predição de cinco propriedades de MDP ($0,84 \leq R^2_{cal} \leq 0,89$) e sete propriedades de HPP ($0,78 \leq R^2_{cal} \leq 0,98$). As propriedades dos painéis MDP estimadas satisfatoriamente a partir do ensaio de endentação dinâmica foram a RTP, RAPT, RAF, MOE e D; para os painéis HPP incluíram-se, além destas, a RTS e AA2h e o MOR.

A validação dos modelos calibrados para estas propriedades demonstrou robustez e capacidade de generalização para as propriedades RTP, RAPT, RAF, MOE e D do painel MDP ($0,77 \leq R^2_{\text{val}} \leq 0,90$) e as propriedades MOR, MOE e D do painel HPP ($0,84 \leq R^2_{\text{val}} \leq 0,96$).

As propriedades dos painéis mais relacionadas com a sua camada externa (RTS e DS) e o IE2h, apresentaram baixa correlação com as predições realizadas a partir do ensaio de endentação dinâmica.

O ensaio de endentação dinâmica demonstrou ter grande potencial de ser utilizado como método alternativo para predição de propriedades físico-mecânicas dos painéis de madeira reconstituída, considerando a sua praticidade e a boa performance obtida na predição destas propriedades.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, R. P. Sinais digitais de um durômetro portátil para a estimativa de propriedades de madeiras para dormentes. 2015. ix, 86 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/136724>>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM, ASTM E 1876. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. 2007. 15 p.
- ASSIS, A. A. Desenvolvimento de um durômetro portátil para madeiras com o uso de transdutor de deslocamento. 2015. ix, 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/131951>>.
- ASSIS, A. A.; ALEXANDRE, R. P., BALLARIN, A. W. (Dynamic hardness of wood – measurements with an automated portable hardness tester. *Holzforschung*, v. 71, n. 5, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 44p.

- 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.; ALMEIDA, P.A.O.; LARA PALMA, H.A. 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.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites: characteristics of wood composites*. New York. Van Nostrand Reinhold Company. 47p. 1982.
- BOUZAKIS, K.-D.; KOUTOUPAS, G. Bending and indentation tests to determine chipboards' mechanical strength critical stresses and their correlation to the specific cutting force in milling. *Wood science and technology*, v. 37, n. 2, p. 141-159, 2003.
- CAI, Z., WU, Q., LEE, J. N., HIZIROGLU, S. Influence of board density, mat construction, and chip type on performance of particleboard made from eastern red cedar. *Forest Products Journal*, v. 54, n. 12, p. 226, 2004.
- COLENCI, R. A. *Qualificação mecânica de madeiras para uso como dormente ferroviário*. 2002. vii, 81 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90670>.
- COLENCI, R. A. *Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário*. 2006. iii, 83 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/101773>.
- DOYLE, J.; WALKER, J. C. F. Indentation hardness of wood. *Wood and Fiber Science*, v. 17, n. 3, p. 369-376, 1985
- FERRER, A. et al. PLS: A versatile tool for industrial process improvement and optimization. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, v. 24, p. 551-567, 2008. <http://dx.doi.org/10.1002/asmb.716>
- HIRATA, S. et al. Hardness distribution on wood surface. *Journal of Wood Science*, v. 47, n. 1, p. 1-7, 2001.
- 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. 1.

- IWAKIRI, S., STINGHEN, A. B. M., da SILVEIRA, E. L., ZAMARIAN, E. H. C., PRATA, J. G., BRONOSKI, M. (2008). Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. *Floresta*, v. 38, n. 3, 2008.
- KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977.
- LEHMANN, W. F. Simplified test of internal bond in particleboard. *Forest Products Journal*, v. 15, n. 5, p. 223-224, 1965.
- MALONEY, T. M. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. 2nd ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.
- 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
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009. 493 p.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- SEMPLE, K. E.; SMITH, G. D. Prediction of internal bond strength in particleboard from screw withdrawal resistance models. *Wood and Fiber Science*, v. 38, n. 2, p. 256-267, 2007.
- SUN, Y., ARIMA, T. Structural mechanics of wood composite materials 11: Ultrasonic propagation mechanism and internal bonding of particleboard. *Journal of Wood Science*, v. 45, n. 3, p. 221-226, 1999.
- TIBSHIRANI, R. Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, v. 58, n. 1, p. 267-288, 1996.
- VILELA, A. P. et al. Eficiência do ensaio não destrutivo para predição das propriedades mecânicas de painéis aglomerados. Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeiras (EBRAMEM) Curitiba - PR. 2016.
- WANG, S.; CHEN, T; FANN, J. Comparison of internal bond strength and compression shear strength of wood-based materials. *Journal of wood science*, v. 45, n. 5, p. 396-401, 1999.
- VASAUSKAS, V. Geometry effect of indenters on dynamic hardness. In: IMEKO 2000 XVI IMEKO World congress Trans. 2000. p. 343-348.

VASAUSKAS, V. Dynamic hardness during different phases of indentation. VDI BERICHTE, v. 1685, p. 359-364, 2002.

CAPÍTULO 3

PREDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO ESTÁTICA DE PISOS LAMINADOS POR MEIO DO ENSAIO DE ENDENTAÇÃO DINÂMICA

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica para predição da resistência à deformação estática de pisos laminados. O programa experimental foi conduzido com 60 amostras de pisos laminados produzidos industrialmente com substrato de painéis de madeira particulada de alta performance (HPP) e divididos em três grupos com diferentes combinações de espessura, teor de resina e fator de prensagem. Foram obtidos 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica, os quais foram selecionados por meio do método *Stepwise* e utilizados para a predição da resistência à deformação estática. A partir de modelos de regressão múltipla calibrados individualmente para cada grupo de painéis foi possível prever os valores de deformação residual com coeficientes de determinação de 0,60 a 0,93 e baixos erros de predição ($1,3 \mu\text{m} \leq \text{RMSE} \leq 2,7 \mu\text{m}$). Todos os modelos foram estaticamente significativos ($p < 0,05$) e obtiveram boa performance de validação, demonstrando capacidade de generalização. A classificação das amostras feita a partir da deformação residual predita por meio dos modelos de regressão permitiu acurácia de 90% e um coeficiente *kappa* de classificação de 0,8. O ensaio de endentação dinâmica possibilitou a predição da deformação residual dos painéis a partir de um procedimento simples e expedito, demonstrando ter potencial como método alternativo para obtenção da resistência à deformação estática dos pisos laminados, cuja determinação convencional é trabalhosa.

Palavras-chave: Endentação dinâmica. Deformação residual. Resistência à deformação estática. Piso laminado.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the potential of using characteristics of the dynamic indentation test for prediction of the residual deformation to static load of laminate flooring. The experimental program employed 60 samples of laminate flooring industrially manufactured using high performance particleboard (HPP), which were divided into three groups with different combinations of thickness, resin content and pressing factor. Predictor variables selected by Stepwise method from a set of 144 characteristics of the dynamic indentation test were associated with the results of the static load test. Using multiple regression models calibrated individually for each group of panels, it was possible to predict the values of residual deformation reaching coefficients of determination from 0.60 to 0.93 and low prediction errors ($1.3 \mu\text{m} \leq \text{RMSE} \leq 2.7 \mu\text{m}$). All models were statically significant ($p < 0.05$) and obtained good validation performance, demonstrating the ability to generalization. The samples were classified using the predicted residual deformation values reaching accuracy of 90% and a kappa coefficient of classification of 0.8. The dynamic indentation test enabled the prediction of the residual deformation of the panels using a simple and quick procedure, showing potential to be used as an alternative method to obtain the resistance to static load of laminate floors, whose conventional evaluation is laborious.

Keywords: Dynamic indentation. Residual indentation. Static load resistance. Laminate flooring.

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos pesquisas tem demonstrado interesse crescente pelo desenvolvimento de testes rápidos e eficientes para avaliação de propriedades tecnológicas da madeira (HEIN et al., 2015, VAZQUEZ et al., 2015) e de seus produtos (HEIN et al., 2011, MELO; MIGUEL, 2016). Em geral buscam-se métodos alternativos, quando os métodos convencionais apresentam alguma inconveniência, seja de ordem prática, econômica ou tecnológica.

O ensaio convencional de resistência à tração perpendicular de painéis de madeira, por exemplo, tem protocolos rígidos, no tocante ao preparo e condicionamento das amostras e na metodologia. Demanda a utilização de máquina de universal de ensaios, emprego de suportes metálicos colados à amostra, além de tempo para acondicioná-la e testá-la (LEHMANN, 1965). Por este motivo buscam-se ensaios alternativos que promovam maior simplicidade e, sobretudo, agilidade na avaliação desta propriedade (WANG et al., 1988; SUN; ARIMA, 1999; RIALS et al., 2002; SEMPLE, SMITH, 2005). Outro exemplo é o ensaio tradicional gravimétrico de avaliação da densidade básica da madeira, cujo procedimento despende tempo expressivo para imersão da amostra em água até a sua saturação e posterior secagem da mesma. Diversos métodos alternativos também são propostos para avaliação desta propriedade (RINN et al., 1996; RAYMOND; MACDONALD, 1998; ISIK; LI, 2003; GALLEGUILLOS-HART et al., 2010; HEIN et al., 2015).

O ensaio de resistência à deformação estática de pisos laminados, preconizado pela NBR14833 (ABNT, 2013), objeto deste estudo, determina capacidade de recuperação do material após período prolongado de endentação por carga concentrada. Utiliza endentador cilíndrico com área de contato de 100 mm² e carga de 500N aplicada por um tempo de 2,5 horas. Após a remoção da carga aguarda-se um tempo adicional de 2,5 horas para medição da deformação residual promovida no material (diferença entre a espessura inicial e final). Se esta for menor ou igual a 10 µm o material é considerado aprovado; caso contrário, é reprovado. Considerando que o resultado final deve ser obtido a partir da média de três repetições do ensaio, despende-se um tempo em torno 10 horas para sua realização, aos quais ainda se acrescenta o tempo necessário para o condicionamento da amostra.

A deformação residual do material está relacionada com suas propriedades mecânicas de resistência, rigidez e resiliência, as quais podem ser avaliadas por outros métodos convencionais ou alternativos. O ensaio de resistência à deformação estática pode ser considerado, de certa forma, um ensaio de avaliação da dureza, pois expressa a resistência do material à endentação. Nos ensaios clássicos de dureza da madeira - Brinell e Janka - um endentador esférico é pressionado contra o material, sendo a dureza obtida pela razão entre a força aplicada e a endentação promovida no material (DOYLE; WALKER, 1985).

Mais recentemente ensaios de endentação dinâmica foram propostos como alternativa aos ensaios clássicos de dureza, principalmente pelo fato de empregarem dispositivos mecânicos mais simples e, conseqüentemente, permitirem mobilidade (COLENCI, 2006; MEYER et al., 2011; ASSIS, 2015). Utilizam o princípio de elevação de massa para mobilização da energia de endentação e promovem endentações complementares à do primeiro impacto - primeiro ciclo - devido ao ricochete do endentador (COLENCI, 2006).

Estudos têm mostrado que da análise mais detalhada do fenômeno envolvido no ensaio de endentação dinâmica podem ser obtidas estimativas precisas de outras propriedades da madeira, além da própria dureza. Augutis et al. (2005) reportaram bons resultados na predição do módulo de elasticidade de painéis de madeira de baixa densidade (*softboard*) com o uso de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica. Alexandre (2015), em estudo com madeiras de cinco espécies de eucalipto utilizadas para produção de dormentes, encontrou forte associação ($0,71 \leq R^2 \leq 0,98$) entre as propriedades mecânicas mensuradas em ensaios convencionais e as inferidas a partir de 18 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica. Utilizou-se dos sinais de deslocamento, velocidade e aceleração do ensaio dinâmico, sobretudo aqueles registrados no primeiro ciclo de endentação.

Este trabalho estudou a viabilidade de utilização de parâmetros característicos de seis ciclos do ensaio de endentação dinâmica para predição da deformação residual de pisos laminados.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

No programa experimental foram estudadas 60 peças de pisos laminados fabricados com substrato de painéis de madeira particulada de alta performance (HPP, do inglês *high performance particleboard*). Os painéis, divididos em três grupos (20 unidades por grupo), foram produzidos com diferentes combinações de espessura e teor de resina (Tabela 3.1). Sendo todos do tipo de três camadas, estes painéis foram produzidos industrialmente com madeira de eucalipto e resina melamínica e prensados em sistema de prensagem contínua com pressão específicas de 3,24 MPa e temperatura de 198 °C por um tempo de 43 s. A Tabela 3.1 apresenta os valores médios de parâmetros de processos empregados na fabricação destes painéis.

Tabela 3.2-Principais parâmetros de processo utilizados na fabricação dos painéis

Categoria de painel	Espessura (mm)	Densidade (kg m ⁻³)	Razão de compactação	Teor de resina C.I / C.E (%)	Fator de prensagem (s mm ⁻¹)
HPP1	7	725	1,69	10 / 10	6,14
HPP2	7	745	1,73	10,5 / 10,5	6,14
HPP3	8	745	1,73	10,5 / 10,8	5,37

CI: Camada interna CE: Camada externa

Após a fabricação, os painéis foram resfriados por período 96 horas e submetidos a etapa de laminação em prensa cíclica utilizando pressão específica de 3,73 MPa, temperatura de 220 °C e tempo de prensagem de 12 s. Na laminação aplicaram-se filmes de papéis celulósicos impregnados por resina melamínica nas superfícies do painel. Do lado superior um filme de papel decorativo sobreposto por filme de proteção impregnado com óxido de alumínio; do lado inferior apenas filme para estabilidade dimensional.

Ao final da laminação os painéis foram seccionados em peças de piso laminado. Foi obtido um corpo de prova (cp) nas dimensões de (60 x 200) mm² de cada peça, o qual foi submetido ao teste de resistência à deformação estática seguindo, no geral, o preconizado na norma brasileira NBR 14833 (ABNT, 2013).

No mesmo cp foram realizadas três repetições do ensaio de endentação dinâmica. Foi utilizado um durômetro portátil dotado de transdutor de deslocamento e processador embarcado para realização do ensaio de endentação dinâmica. Apresentado em detalhes em Assis (2015), utiliza-se de endentador esférico de 10 mm de diâmetro e energia de endentação de 1,96 J, obtida pela combinação da elevação de uma massa de 1 kg a uma altura de 200 mm.

Com o durômetro portátil foi possível registrar o sinal de deslocamento do endentador por um período de 694 ms a uma taxa de 10 kHz e assim avaliar os seis primeiros ciclos de cada ensaio. Estudos preliminares evidenciaram que em painéis de MDP é comum se observar até 18 ciclos para dissipação completa da energia, o que ocorre em torno de 900 ms.

Os sinais de deslocamento registrados pelo durômetro portátil foram processados no *Wood Indentation Analyzer*⁷ (WIA), programa computacional desenvolvido especificamente para este fim. Além de aplicar filtros no sinal original de deslocamento e realizar a derivação deste sinal em velocidade e, posteriormente, em aceleração, o WIA foi responsável por aplicar os algoritmos para extração dos parâmetros característicos selecionados e mensurados diretamente (deslocamentos, velocidades, acelerações e tempo) e dos parâmetros calculados indiretamente como, por exemplo, as forças - obtidas pelo produto da massa do endentador por sua aceleração. Todos os parâmetros obtidos direta e indiretamente dos sinais digitais foram selecionados a partir de ensaios piloto.

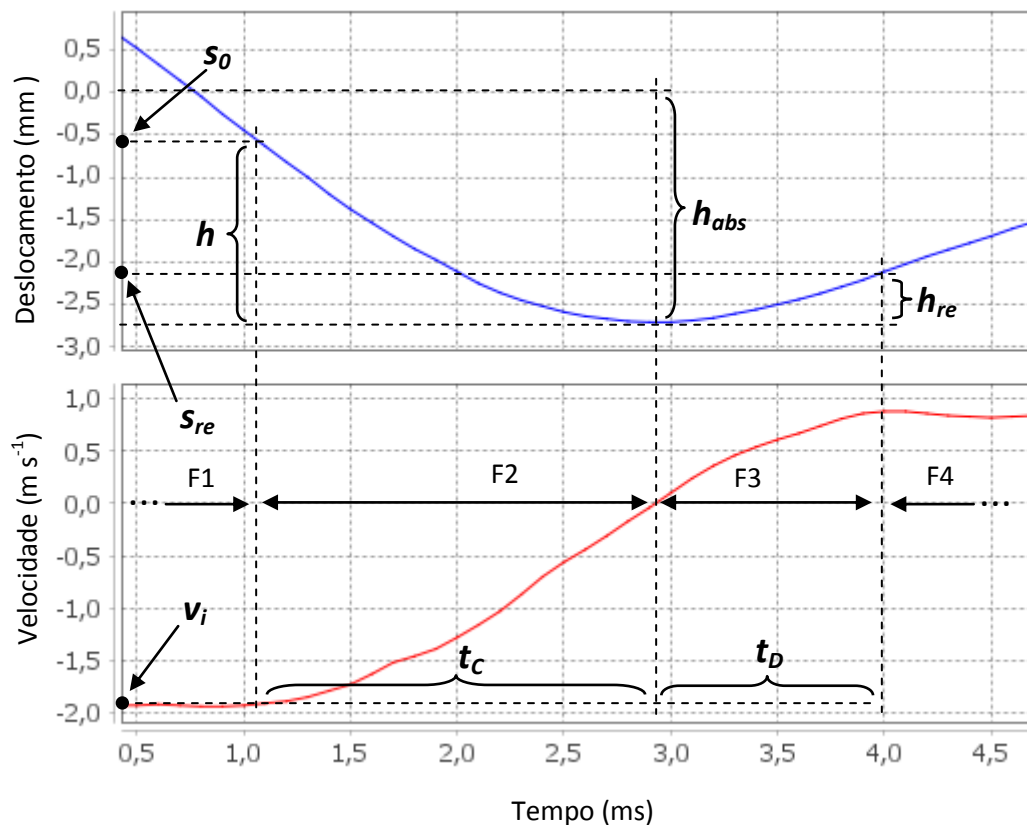
Ensaio de endentação dinâmica com mobilização de energia por queda livre de massa promovem endentações complementares à do primeiro impacto - primeiro ciclo - devido ao ricochete do endentador. Um ciclo do ensaio de dinâmico corresponde ao período de tempo que compreende as suas fases de queda livre (F1), carregamento (F2), descarregamento (F3) e movimento livre de retorno do endentador (F4). A endentação, propriamente dita, se refere à fase de carregamento, somente.

Os instantes em que ocorrem as mudanças das fases de cada ciclo do ensaio dinâmico foram identificados a partir da análise de seus sinais de velocidade e de deslocamento. Para o primeiro ciclo, por exemplo, a fase de carregamento inicia-se

⁷ Patente requerida

no instante em que o deslocamento é igual a zero (endentador toca a madeira); já para o segundo ciclo, esse instante é identificado quando velocidade alcança seu valor máximo negativo, proporcionado pelo movimento de queda livre (v_i - Figura 3.1). Quando a profundidade de endentação atinge o valor máximo (h), ocasião em que a velocidade é igual a zero, inicia-se a fase de recuperação elástica ou descarregamento (F3 - Figura 3.1), isto é, fase em que o endentador é acelerado no movimento reverso até perder o contato com a madeira. Neste instante, que é detectado quando a velocidade atinge seu valor máximo positivo, inicia-se a fase de movimento livre de retorno do endentador, ocasião em que é mensurado o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}).

Figura 3.1- Exemplo de identificação das fases do ensaio dinâmico a partir de seus sinais de deslocamento e velocidade



O ensaio de endentação dinâmico foi analisado a partir de parâmetros característicos de cada fase de seus ciclos e, também, a partir de parâmetros representativos do ensaio completo. Ainda, alguns parâmetros cogitados inicialmente (ensaios piloto) para análise acabaram, por fim, removidos, por serem altamente correlacionados a outros. Como exemplo citam-se a altura inicial e o tempo total de queda livre ou, ainda, a energia potencial inicial e a energia cinética

no início do carregamento. Todos os parâmetros da fase de queda livre foram resumidos exclusivamente à velocidade inicial de carregamento - v_i .

Os parâmetros selecionados e obtidos de cada fase foram:

Fase de queda livre: velocidade inicial da fase de carregamento (v_i).

Fase de carregamento: dureza dinâmica (HD), profundidade efetiva (h) e absoluta (h_{abs}) de endentação, deslocamento inicial de endentação (s_0), tempo de endentação (t_C), força média (F_{medC}) e máxima (F_{maxC}) de carregamento, taxa de carregamento (T_C) e relação força-deslocamento em 5 segmentos da endentação ($R_{fd1..5}$).

Fase de descarregamento: deslocamento de recuperação elástica (h_{re}), deslocamento final de recuperação (s_{re}), tempo de recuperação elástica (t_{re}), força média (F_{medD}) de descarregamento, taxa de descarregamento (T_D), fator (f_{re}) e taxa (T_{re}) de recuperação elástica.

Fase de movimento livre de retorno: deslocamento de recuperação (s_r), taxa de decremento parcial (δ) e fator de amortecimento (b).

Os parâmetros relacionados com o ensaio completo foram o fator de amortecimento total (b_t) e taxa de decremento total (δ_t).

A dureza dinâmica foi calculada a partir da Eq. 3.1 (ASSIS et al., 2017), onde HD é a dureza dinâmica (MPa), F é a força média resultante do impulso da endentação (N), D é o diâmetro do endentador (mm), h é a profundidade de endentação (mm), m é a massa do endentador (kg), Δv é a variação da velocidade durante a endentação ($m\ s^{-1}$) e Δt é o tempo de endentação (s).

$$HD = \frac{F}{\pi D h} = \frac{m \frac{\Delta v}{\Delta t}}{\pi D h} \quad (3.1)$$

As taxas de decremento parcial (δ) e total (δ_t), que expressam o decremento logarítmico do amortecimento observado nos ciclos do ensaio dinâmico, foram calculadas a partir da Equação geral 3.2, onde δ é a taxa de decremento logarítmico, A_i é a altura inicial de queda livre (mm), s_r é o deslocamento de recuperação (mm) e n é o número de ciclos analisados. A taxa de decremento total utiliza a altura inicial do ensaio (200 mm) e o deslocamento de recuperação do sexto ciclo.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_i}{s_r}\right) \quad (3.2)$$

O fator de amortecimento foi calculado com a Eq. 3.3, onde b é o fator de amortecimento (kg s^{-1}), m é a massa do endentador (kg), t é o tempo (s), A_i é a altura inicial de queda livre (mm), e s_r é o deslocamento de recuperação (mm).

$$b = -\frac{2m}{t} \ln \frac{s_r}{A_i} \quad (3.3)$$

As taxas de carregamento e descarregamento (em N mm^{-1}) foram obtidas a partir das razões entre a força máxima (N) e os deslocamentos efetivos empreendidos nas fases de carregamento e descarregamento (mm), respectivamente.

O fator de recuperação elástica expressou a razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) de cada ciclo e a endentação absoluta do primeiro ciclo (h_{abs}), já a taxa de recuperação elástica, dada em mm s^{-1} , foi obtida a partir da razão entre o deslocamento inicial de endentação (s_0) e o intervalo de tempo (Δt) decorrido desde o instante em que ocorreu a profundidade máxima de endentação do primeiro ciclo e o instante inicial de carregamento do ciclo em análise. Ao invés de utilizar o deslocamento de recuperação elástica (h_{re}) para cálculo do fator e taxa de recuperação, se utiliza o deslocamento inicial de endentação (s_0), pois este último, a partir do segundo ciclo, indica a parcela de deformação restituída no material. Por este motivo, tanto o fator quanto a taxa de recuperação elástica foram medidos somente a partir do segundo ciclo do ensaio.

As relações força-deslocamento das frações de tempo da endentação foram calculadas conforme procedimento já adotado anteriormente em Alexandre (2015). O intervalo de tempo de endentação foi dividido em cinco segmentos de mesma duração, sendo o valor médio da razão força-deslocamento calculado para cada um destes segmentos. Essas relações expressam grandezas com a mesma natureza da rigidez do material, ou seja, força para promover um deslocamento unitário.

No total foram obtidos 144 parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica ($22 + 24 \times 5 + 2$), sendo 22 do primeiro ciclo (f_{re} e T_{re} não são calculados neste período), 24 nos próximos cinco ciclos e 2 parâmetros

característicos do ensaio completo (b_t e δ_t). Cada parâmetro foi representado pelo valor médio de três repetições do ensaio dinâmico realizadas em cada cp.

Inicialmente, associações lineares entre cada parâmetro particular do ensaio de endentação dinâmica e a deformação residual dos painéis foram avaliadas por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Posteriormente foram ajustados quatro modelos de regressão linear múltipla entre os parâmetros do ensaio dinâmico e a deformação residual: o primeiro utilizando os resultados de todas as categorias de painéis simultaneamente - modelo geral - e os outros três utilizando os resultados de cada categoria separadamente - modelos HPP1, HPP2 e HPP3.

Os parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica foram selecionados por meio do método estatístico *Stepwise* (MONTGOMERY; RUNGER, 2009) e utilizados para predição da deformação residual (DR) dos painéis por meio de regressão múltipla.

O método *Stepwise* foi parametrizado para obter modelo com maximização do coeficiente de determinação (R^2) e minimização do erro de predição (RMSE, do inglês *root mean square error*), limitando-se as variáveis preditoras " p " em, no máximo, 20 % do número de observações.

A capacidade de generalização dos modelos obtidos foi verificada pelo método de validação cruzada *k-fold*, utilizando-se 10 repetições com 5 particionamentos (*folds*), ou seja, 80 % das observações foram utilizadas para treinamento do modelo - calibração - e 20% das amostras para a etapa de validação deste modelo. O resultado final de validação foi dado pela média dos resultados individuais das 10 repetições de cada etapa do algoritmo de validação.

Os resultados de deformação residual e suas predições, realizadas pelos modelos de regressão múltipla, foram divididos nas categorias "aprovado" e "reprovado" ($\text{aprovado} \leq 10\mu\text{m} < \text{reprovado}$) e comparados por meio de matriz de confusão. A performance da classificação foi avaliada pela acurácia geral e pelo coeficiente *kappa* de classificação.

As análises estatísticas foram realizadas por meio do ambiente computacional "R" versão 3.6.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à deformação estática da categoria HPP1 apresentaram grande variação se comparados com os resultados das outras categorias (Tabela 3.2), o que pode ser atribuído, inicialmente, ao menor teor de resina empregado nesses painéis (Tabela 3.1); todavia, a relação entre o teor de resina com os resultados de deformação residual não pôde ser claramente deduzida a partir dos dados apresentados na Tabela 3.2. A categoria HPP3, por exemplo, que empregou teor de resina camada exterior ligeiramente superior em relação à categoria HPP2, apresentou deformação residual média maior que esta.

Tabela 3.2 - Estatística descritiva das deformações residuais obtidas no ensaio convencional

Categoria	Deformação residual (μm)			
	$\bar{X}$	Min	Máx	s
HPP1	16,10	3	44	10,41
HPP2	6,85	3	14	3,34
HPP3	10,35	3	17	3,77

Possivelmente, uma explicação mais adequada para as diferenças de deformação residual encontradas entre estas duas categorias seja as diferentes espessuras utilizadas e, conseqüentemente, diferentes fatores de prensagem. O fator de prensagem, dado em s mm^{-1} , expressa a razão entre o tempo de prensagem e a espessura do painel e é determinante no processo de transferência de calor da prensa para o produto (KELLY, 1977). Os painéis HPP3 utilizaram um teor de resina da camada externa em torno de 3% acima do utilizado nos painéis HPP2 e um fator de prensagem inferior em 8% (Tabela 3.1).

Os parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica apresentaram baixos coeficientes de correlação com a deformação residual dos painéis na análise geral, isto é, utilizando os resultados das três categorias de painéis simultaneamente. O melhor resultado, obtido com o parâmetro deslocamento inicial (s_0), revelou correlação negativa, variando de -0,24 a -0,32 para os seis ciclos do ensaio dinâmico. A dureza dinâmica apresentou correlação com a deformação residual da mesma ordem de grandeza no primeiro ciclo de endentação ($r = 0,28$) e valores baixos de coeficiente de correlação de Pearson, próximos a zero, para os

ciclos seguintes. Todos os outros parâmetros apresentaram coeficientes de correlação menores que 0,3. Para madeira, a dureza dinâmica é fortemente associada com a dureza Janka com coeficiente de determinação da regressão linear $R^2 = 0,83$ (Assis et al., 2017).

A Tabela 3.3 apresenta os coeficientes de correlação entre os parâmetros de seis ciclos do ensaio dinâmico e os resultados de deformação residual obtidas de análises realizadas individualmente para cada categoria de painéis.

Tabela 3.3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre de parâmetros de seis ciclos do ensaio de endentação dinâmica e a deformação residual das três categorias de painéis

	HPP1						HPP2						HPP3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
HD	0,52	0,11	0,07	0,06	0,02	0,01	0,17	0,01	0,15	0,20	0,22	0,34	0,11	0,17	0,04	0,08	0,03	0,01
h	0,51	0,23	0,02	0,14	0,09	0,00	0,19	0,22	0,07	0,19	0,10	0,16	0,12	0,27	0,03	0,11	0,10	0,00
h _{re}	0,16	0,20	0,09	0,08	0,11	0,01	0,17	0,32	0,08	0,02	0,08	0,06	0,00	0,27	0,12	0,02	0,00	0,19
S _r	0,03	0,08	0,25	0,21	0,09	0,15	0,28	0,14	0,22	0,26	0,27	0,16	0,01	0,07	0,07	0,22	0,21	0,22
S ₀	-	0,45	0,56	0,56	0,35	0,37	-	0,46	0,16	0,07	0,21	0,24	-	0,11	0,09	0,06	0,11	0,18
h _{abs}	0,51	0,52	0,30	0,24	0,18	0,23	0,19	0,14	0,14	0,18	0,19	0,23	0,12	0,13	0,11	0,14	0,15	0,12
S _{re}	0,40	0,47	0,20	0,27	0,29	0,25	0,12	0,01	0,12	0,19	0,35	0,33	0,14	0,21	0,02	0,12	0,14	0,22
t _C	0,55	0,09	0,06	0,03	0,00	0,04	0,18	0,14	0,15	0,17	0,21	0,35	0,03	0,14	0,06	0,05	0,04	0,01
t _D	0,01	0,23	0,05	0,07	0,12	0,07	0,27	0,32	0,00	0,07	0,04	0,01	0,05	0,19	0,14	0,05	0,00	0,12
v _i	0,20	0,11	0,09	0,22	0,15	0,07	0,21	0,19	0,24	0,21	0,23	0,21	0,25	0,03	0,03	0,13	0,20	0,19
F _{medC}	0,51	0,01	0,08	0,07	0,14	0,00	0,14	0,15	0,20	0,21	0,27	0,38	0,08	0,08	0,04	0,02	0,03	0,06
F _{medD}	0,03	0,21	0,01	0,03	0,03	0,03	0,35	0,30	0,07	0,19	0,13	0,04	0,04	0,16	0,08	0,10	0,03	0,15
F _{maxC}	0,27	0,00	0,16	0,06	0,16	0,03	0,30	0,27	0,12	0,15	0,18	0,22	0,05	0,08	0,16	0,11	0,10	0,11
T _C	0,44	0,13	0,13	0,09	0,01	0,01	0,26	0,07	0,12	0,19	0,18	0,28	0,04	0,10	0,10	0,05	0,01	0,04
T _D	0,21	0,10	0,06	0,13	0,00	0,07	0,24	0,39	0,01	0,07	0,03	0,09	0,03	0,30	0,11	0,08	0,02	0,13
δ	0,04	0,07	0,31	0,07	0,20	0,24	0,28	0,06	0,20	0,17	0,20	0,18	0,01	0,15	0,01	0,38	0,10	0,08
b	0,05	0,12	0,35	0,15	0,04	0,23	0,27	0,04	0,22	0,21	0,24	0,06	0,02	0,16	0,10	0,36	0,21	0,17
R _{fd1}	0,16	0,01	0,16	0,21	0,12	0,09	0,19	0,35	0,06	0,26	0,05	0,12	0,09	0,07	0,08	0,15	0,18	0,14
R _{fd2}	0,16	0,00	0,18	0,22	0,13	0,11	0,21	0,35	0,06	0,25	0,04	0,09	0,11	0,08	0,07	0,12	0,21	0,15
R _{fd3}	0,13	0,01	0,19	0,22	0,14	0,12	0,22	0,37	0,06	0,24	0,02	0,06	0,14	0,10	0,07	0,10	0,23	0,16
R _{fd4}	0,04	0,01	0,20	0,21	0,14	0,11	0,24	0,42	0,08	0,21	0,01	0,04	0,19	0,14	0,07	0,09	0,25	0,16
R _{fd5}	0,14	0,02	0,21	0,17	0,09	0,02	0,22	0,55	0,13	0,12	0,01	0,00	0,26	0,22	0,09	0,09	0,30	0,08
f _{re}	-	0,16	0,18	0,38	0,19	0,12	-	0,32	0,05	0,21	0,11	0,09	-	0,23	0,00	0,01	0,01	0,19
T _{re}	-	0,24	0,25	0,26	0,40	0,35	-	0,07	0,20	0,27	0,22	0,24	-	0,16	0,01	0,03	0,00	0,05
δ _t			0,17						0,12						0,24			
b _t			0,21						0,17						0,19			

Valores destacados em cinza: coeficientes de correlação de Pearson maiores ou iguais a 0,3 | Valores destacados em caixas: seus respectivos parâmetros foram selecionados pelo método Stepwise para ajuste do modelo de regressão múltipla | Valores em vermelho: correlação negativas | Valores em azul: correlações positivas

Todas as categorias apresentaram correlações de baixas a moderadas entre a deformação residual e os parâmetros do ensaio dinâmico, porém com valores mais altos do que aqueles alcançados com a associação geral. O melhor resultado foi obtido a partir do deslocamento inicial de carregamento do terceiro ciclo (s_{03}) na categoria HPP1 ($r = 0,56$).

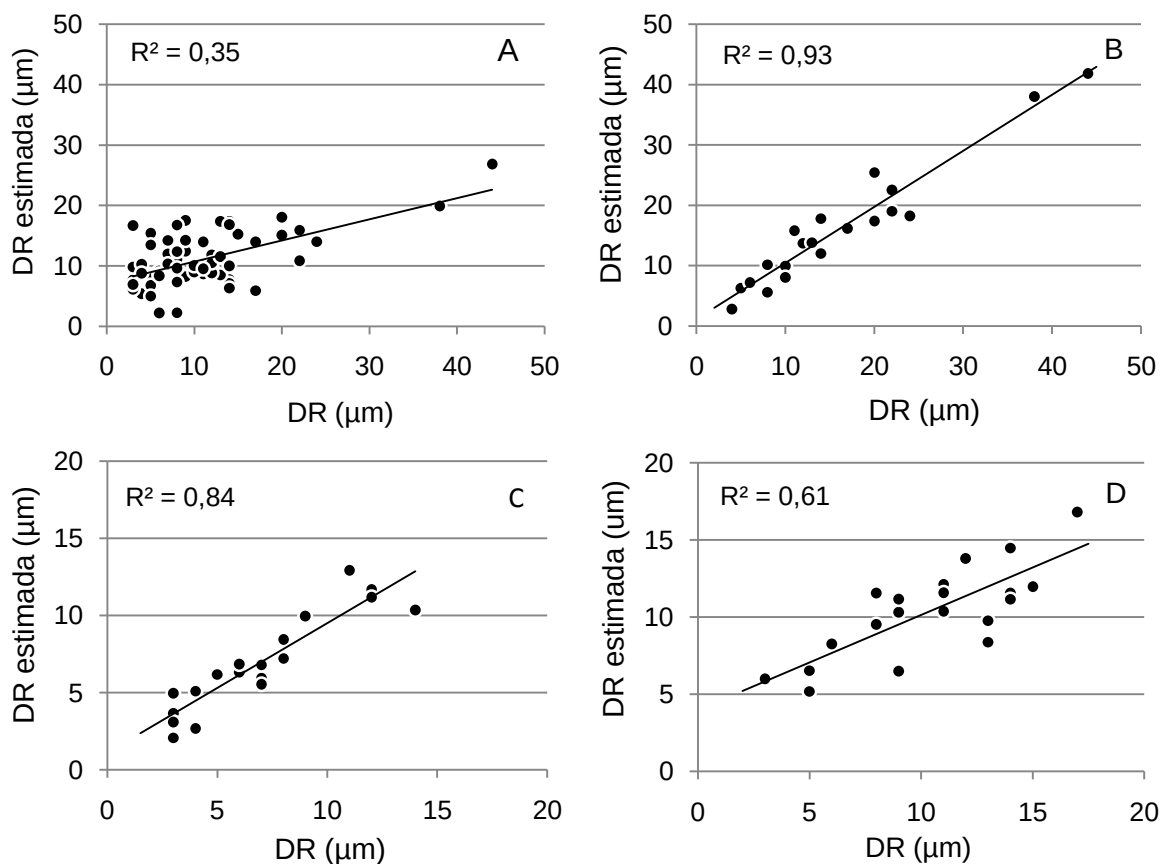
A Tabela 3.3 apresenta destacados em cinza os coeficientes de correlação de Pearson que tiveram valores, em módulo, maiores ou iguais a 0,3. Observa-se superioridade de ocorrências nas categorias HPP1 e HPP2; na categoria HPP3, são apontadas somente três correlações.

Todavia, não é possível identificar entre as categorias um padrão consistente de distribuição de valores enquadrados nessa situação. Todos os ciclos do parâmetro s_0 , por exemplo, foram destacados em HPP1, porém só o segundo ciclo do mesmo parâmetro teve destaque em HPP2; já os parâmetros R_{fd} , que foram todos destacados no segundo ciclo em HPP2, não apresentaram correlações equivalentes com as outras categorias. Na categoria HPP2, a maior quantidade de correlações em módulo maiores que 0,3 foram apontadas no segundo ciclo do ensaio, o que não ocorreu para as outras categorias.

Os painéis de cada categoria foram produzidos com combinações diferentes de teor de resina, espessura e fator de prensagem (Tabela 3.1), o que resultou em alterações em suas propriedades mecânicas, observadas nos valores de deformação residual da Tabela 3.2. Os parâmetros característicos do ensaio dinâmico tiveram comportamentos distintos para cada categoria, demonstrando que foram influenciados pelas variações das propriedades mecânicas dos painéis, porém, não foi possível encontrar uma relação clara entre algum destes parâmetros em específico com a deformação residual dos painéis.

Os modelos de regressão linear múltiplos ajustados entre os parâmetros característicos do ensaio dinâmico e a deformação residual dos painéis apresentaram coeficientes de determinação de moderados a fortes (Figura 3.2), com exceção do modelo geral, que apresentou $R^2 = 0,35$.

Figura 3.2 - Gráficos de dispersão entre valores mensurados de deformação residual dos painéis e estimados pelos modelos de regressão: modelo geral (A) e modelos específicos HPP1 (B), HPP2 (C) e HPP3 (D)



Observa-se nos gráficos entre os valores mensurados e estimados das categorias HPP1 e HPP2 (Figura 3.2-B e 3.2-C) que os valores apresentaram baixa dispersão, indicando uma associação mais forte entre os valores mensurados e estimados. Destaca-se também os baixos erros de predição apresentados na Tabela 3.4; onde pode-se observar que a categoria HPP3 também obteve baixos valores de erro, porém com coeficiente de determinação mais baixo.

Tabela 3.4 - Desempenho dos modelos de predição da deformação residual dos painéis na etapa de calibração.

Modelos		R^2_{cal}	RMSEC
Específicos	HPP1	0,93	2,7
	HPP2	0,84	1,3
	HPP3	0,61	2,3
Geral		0,35	5,5

RMSEC – erro de predição do modelo de calibração, expresso em μm

O alto coeficiente de determinação obtido no modelo HPP1 foi influenciado por dois resultados isolados na faixa de 40 μm , que podem ser observados na Figura 3.2-B. O modelo HPP2 teve o melhor desempenho de predição; a despeito de obter um coeficiente de determinação inferior ao do modelo HPP1, obteve um erro de predição de apenas 1,3 μm . A associação do modelo HPP3 (Figura 3.2-D) apresentou o menor coeficiente de determinação dentre os modelos específicos e, também, os menores índices de correlação de Pearson (Tabela 3.3). Os parâmetros utilizados no modelo obtido por regressão múltipla (Tabela 3.5), contudo, não corresponderam aos parâmetros que apresentaram as maiores correlações na Tabela 3.3. Esse fato, também observado para as categorias HPP1 e HPP2, se deve à própria natureza do modelo de regressão múltipla, onde duas variáveis que apresentam baixa significância para o modelo quando analisadas individualmente, podem apresentar alta significância quando associadas simultaneamente. Por vezes, podem até mesmo substituir uma variável que tomada, isoladamente, apresente boa significância para a associação (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

A performance dos modelos na etapa de validação, realizada pelo método *k-fold*, bem como os modelos de regressão múltipla estimados estão apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Performance dos modelos de regressão múltipla (etapa de validação) na predição da deformação residual dos painéis

Grupos	Modelos estimados	R^2_{val}	RMSECV
HPP1	$DR_{\text{HPP1}} = -392,9 + 381,7.h_1 - 67,51.t_{C6} + 4,33.b_t - 335,6.f_{re2}$	0,85	3,94
HPP2	$DR_{\text{HPP2}} = -29,65 + 0,015.T_{C6} - 0,013.T_D + 62,34.\delta_3 - 0,004.R_{fd5-2}$	0,73	1,76
HPP3	$DR_{\text{HPP3}} = 139,36 + 5,20.HD_1 - 0,066.T_{C2} + 0,0036.R_{fd5-1} - 298,7.f_{re2}$	0,52	2,98
Geral	$DR = 161,9 - 6,13.HD_1 + 104,5.\delta_2 - 27,50.t_{D4}$	0,34	6,25

RMSECV expresso em μm

Os modelos específicos (HPP1, HPP2 e HPP3) utilizaram quatro variáveis preditoras - selecionadas pelo método Stepwise - e foram significativos pelo teste F ($p < 0,05$); já o modelo geral obteve o mesmo nível de significância com o uso de três variáveis preditoras. Todos os coeficientes, tanto do modelo geral, quanto dos modelos específicos, foram significativos ($p < 0,05$).

A baixa performance de predição do modelo geral em relação aos modelos específicos (Tabela 3.4 e Figura 3.2) na etapa de calibração demonstra que a predição da deformação residual dos painéis a partir dos parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmico só é viável se for precedida por uma etapa de calibração específica do modelo de regressão para o material que será avaliado. Os melhores resultados do processo de validação cruzada dos modelos específicos, expressos por R^2_{val} e RMSECV (Tabela 3.5), evidenciam a boa capacidade de generalização dos modelos que foram calibrados para os painéis da mesma categoria.

A Tabela 3.6 apresenta a matriz de classificação dos modelos específicos com seus resultados categorizados em aprovado (A) e reprovado (R) utilizando-se o limiar de $A \leq 10 \mu m < B$.

Tabela 3.6 - Matriz de confusão dos modelos específicos HPP1, HPP2 e HPP3

		Predito						Total	Erro de exclusão (%)	Acurácia (%)	
		HPP1		HPP2		HPP3					
		R	A	R	A	R	A				
R e a l	HPP1	R	13	0				13	0	95	
		A	1	6				7	14		
	HPP2	R			4	0		4	0	100	
		A			0	16		16	0		
	HPP3	R					9	2	11	18	75
		A					3	6	9	33	
Total			14	6	4	16	12	8			
Erro de inclusão (%)			7	0	0	0	25	25			

R: reprovado A: aprovado

O modelo HPP2, que apresentou a melhor performance de predição da deformação residual ($R^2_{val} = 0,75$ e $RMSECV = 1,76 \mu m$ - Tabela 3.5) alcançou acurácia de classificação 100%. Resultado semelhante de classificação foi obtido na categoria HPP1, onde houve 19 acertos em um total de 20 predições (acurácia de 95%). A baixa performance na predição da deformação residual dos painéis da categoria HPP3 ($R^2 = 0,52$ e $RMSECV = 2,98$) também foi confirmada nos resultados de classificação, onde foi obtida acurácia de 75% (15 acertos em 20 predições).

Nesta categoria alcançou-se um erro de exclusão - falso positivo - de 33% para a classe "aprovado".

O resultado geral de classificação da deformação residual a partir dos parâmetros característicos do ensaio dinâmico e de modelos específicos de regressão para cada categoria (Tabela 3.7) foi de 90% de acurácia (54 acertos em 60 predições) e um coeficiente *kappa* de classificação de 0,8. Os erros de inclusão e exclusão não tiveram desbalanceamento significativo, porém foi observada uma pequena tendência de reprovação de resultados.

Tabela 3.7 - Resumo da matriz de confusão dos modelos específicos

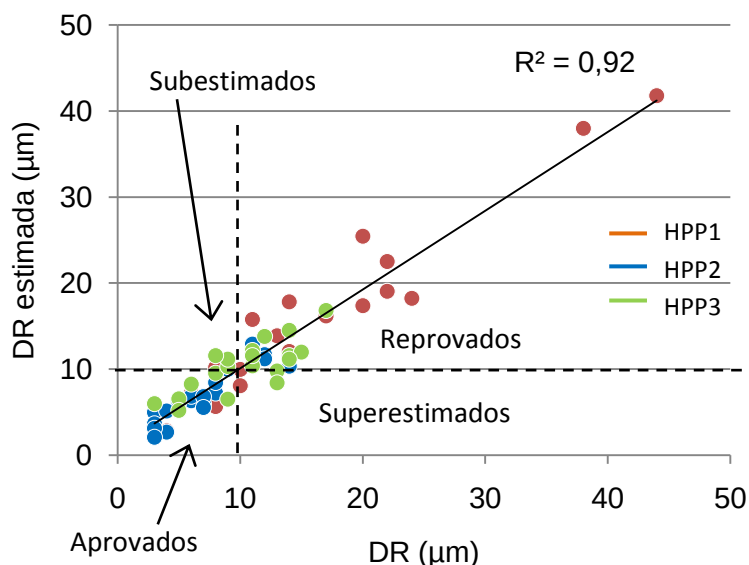
		Predito			Erro de exclusão (%)
		R	A	Total	
Real	R	26	2	28	7,1
	A	4	28	32	12,5
Total		30	30		
Erro de inclusão (%)		13,3	6,7		

R: reprovado A: aprovado

De um total de 32 resultados aprovados, 4 foram preditos na classe de resultados reprovados (subestimados) e de um total de 28 resultados reprovados, 2 foram incluídos na classe de resultados aprovados (superestimados).

A Figura 3.3 apresenta os resultados das associações dos modelos específicos HPP1, HPP2 e HPP3 em um mesmo gráfico de dispersão. As linhas tracejadas, sobrepostas no limiar utilizado para a classificação dos resultados (10 μm), separam os quadrantes de resultados aprovados, reprovados, sub e superestimados. Observa-se que os resíduos da associação próximos ao limiar de classificação, impõem o aparecimento de sub ou superestimações, porém não afetam o resultado da classificação quando se afastam do limiar. Os maiores erros de predição na Figura 3.3, por exemplo, a despeito de seus valores, se referem a resultados que foram classificados corretamente (valores entre 20 e 30 μm do eixo das abscissas).

Figura 3.3 - Associação de valores mensurados e estimados de deformação residual de painéis obtidos pelos modelos específicos HPP1, HPP2 e HPP3



O durômetro portátil utilizado neste estudo proporcionou um procedimento simples e prático para a aplicação do ensaio de endentação dinâmica. Cada ensaio, considerado desde o posicionamento do equipamento sobre a amostra até a sua finalização, despendeu um tempo de aproximadamente 5 segundos. Considerando a possibilidade de integração dos modelos de regressão obtidos neste trabalho, ao programa do processador eletrônico embarcado do durômetro, seria possível obter estimativas rápidas de deformação residual a partir do ensaio de endentação dinâmica.

3.4 CONCLUSÕES

Os parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica apresentaram baixas associações lineares com a deformação residual dos painéis quando utilizados individualmente ($r \leq 0,56$).

Para cada categoria distinta de painéis, fabricados com diferentes combinações de teor de resina, espessura e fator de prensagem, houve diferentes níveis de deformação residual e também correlações diferenciadas entre estas e os parâmetros do ensaio dinâmico. Parâmetros que não apresentaram nenhuma

correlação com a deformação residual de uma categoria de painel, proporcionaram correlação fraca ou moderada com a deformação residual de outra categoria.

Os parâmetros do ensaio dinâmico foram influenciados pelas variações das propriedades mecânicas dos painéis (observadas pelos resultados de deformação residual e causadas pelo emprego de diferentes parâmetros de processo), porém, não foi possível encontrar uma relação clara entre qualquer um destes parâmetros e os resultados de deformação residual dos painéis.

Não foi possível utilizar um modelo geral para predição da deformação residual dos painéis a partir de parâmetros característicos do ensaio de endentação dinâmica, pois estes parâmetros apresentaram variações particularizadas para cada categoria de painel.

A partir de modelos de regressão múltipla calibrados individualmente para cada categoria de painel foi possível prever os valores de deformação residual com coeficientes de determinação de $0,60 \leq R^2 \leq 0,93$ e baixos erros de predição ($1,3 \mu\text{m} \leq \text{RMSE} \leq 2,7 \mu\text{m}$). Foram utilizados modelos simples com quatro parâmetros - variáveis preditoras - obtidos de até seis ciclos do ensaio de endentação dinâmica. Todos os modelos foram estaticamente significativos ($p < 0,05$) e obtiveram boa performance de validação, demonstrando capacidade de generalização dentro da mesma categoria.

A classificação dos painéis feita a partir da deformação residual predita pelos modelos específicos de regressão múltipla permitiu acurácia de 90% e um coeficiente *kappa* de classificação de 0,8.

O ensaio de endentação dinâmica possibilitou a predição da deformação residual dos painéis a partir de um procedimento simples e expedito, demonstrando ter potencial como método alternativo para obtenção da resistência à deformação estática.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, R. P. Sinais digitais de um durômetro portátil para a estimativa de propriedades de madeiras para dormentes. 2015. ix, 86 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/136724>>.
- ASSIS, A. A. Desenvolvimento de um durômetro portátil para madeiras com o uso de transdutor de deslocamento. 2015. ix, 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/131951>>.
- ASSIS, A., ALEXANDRE, R., BALLARIN, A. (2017) Dynamic hardness of wood – measurements with an automated portable hardness tester. *Holzforschung*, v. 71, n. 5, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14833: Revestimento de pisos laminados melamínicos de alta resistência. Parte 1: Requisitos, características, classificações e métodos de ensaio – Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 44p.
- 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.
- COLENCI, R. A. Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário. 2006. iii, 83 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101773>>.
- DOYLE, J.; WALKER, J. C. F. Indentation hardness of wood. *Wood and Fiber Science*, v. 17, n. 3, p. 369-376, 1985
- GALLEGUILLOS-HART, C.; FERNÁNDEZ, M. P.; GUESALAGA, A. A portable method to estimate wood basic density from increment cores using spectroscopic techniques. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 18, n. 6, p. 465-472, 2010.
- HEIN, P. R. G. et al. Estimation of physical and mechanical properties of agro-based particleboards by near infrared spectroscopy. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 69, n. 3, p. 431-442, 2011.
- HEIN, P. R. G. et al. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *E. grandis*. *Cerne*, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2015.

- ISIK, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph® for selection in tree improvement programs. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 33, n. 12, 2003.
- KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977.
- LEHMANN, W. F. Simplified test of internal bond in particleboard. *Forest Products Journal*, v. 15, n. 5, p. 223-224, 1965.
- MELO, R. R.; MIGUEL, E. P. Use of artificial neural networks in predicting particleboard quality parameters. *Revista Árvore*, v. 40, n. 5, p. 949-958, 2016.
- 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.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009. 493 p.
- RAYMOND, C.; MACDONALD, A. Where to shoot your Pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, v. 15, p. 205-221, 1998.
- RIALS, Timothy G.; KELLEY, Stephen S.; SO, Chi-Leung. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. *Wood and Fiber Science*, v. 34, n.33, p. 398-407, 2002.
- RINN, F.; SCHWEINGRUBER, H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation on drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, v. 50, n. 4, p. 303-311, 1996.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- SEMPLE, K. E.; SMITH, G. D. Prediction of internal bond strength in particleboard from screw withdrawal resistance models. *Wood and Fiber Science*, v. 38, n. 2, p. 256-267, 2007.
- SUN, Y., ARIMA, T. Structural mechanics of wood composite materials 11: Ultrasonic propagation mechanism and internal bonding of particleboard. *Journal of Wood Science*, v. 45, n. 3, p. 221-226, 1999.
- VÁZQUEZ, C. et al. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression

and bending methods. Wood Science and Technology, v. 49, n. 3, p. 607-622, 2015.

WANG, S.; CHEN, T; FANN, J. Comparison of internal bond strength and compression shear strength of wood-based materials. Journal of wood science, v. 45, n. 5, p. 396-401, 1999.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de endentação dinâmica demonstrou ter grande potencial como método alternativo para predição das principais propriedades físico-mecânicas da madeira, dos painéis MDP e da resistência à deformação estática dos pisos laminados.

Considerando a possibilidade de integração dos modelos de regressão obtidos neste trabalho ao programa do processador eletrônico embarcado do durômetro, podem-se obter boas estimativas de propriedades da madeira e de seus produtos a partir de um único equipamento portátil com procedimento de operação simples e expedito.

Os ensaios de avaliação da resistência à tração perpendicular de painéis MDP e da resistência à deformação estática dos pisos laminados, que são de determinação convencional trabalhosa, podem ser simplificados com o uso do ensaio de endentação dinâmica. Ensaio rápidos destas propriedades podem ser realizados para avaliação periódica do processo produtivo, não com intuito de substituir os ensaios convencionais, que em geral são normativos e compulsórios no programa de qualidade das empresas, mas como complemento à rotina operacional. Aguardar por 10 horas o resultado de um ensaio, para então realizar ajustes no processo, caso necessário, não é uma prática satisfatória. Os ensaios de endentação dinâmica, que são realizados em poucos segundos, podem ser bons indicadores da qualidade do produto, podendo revelar antecipadamente a necessidade de possíveis ajustes no processo produtivo.

Além do procedimento simples de operação, o ensaio de endentação dinâmica também permite mobilidade, habilitando tarefas de avaliação da qualidade em condições de campo, que podem ser de grande utilidade para empresas que comercializam ou utilizam madeira serrada. Os ensaios convencionais, quando aplicados por estas empresas, se baseiam em amostragem e são realizados, primordialmente, em laboratórios; já o ensaio dinâmico, por ser prático e portátil, pode abranger amostragens maiores, ou em alguns casos, até mesmo ser aplicado para avaliação do lote completo. As empresas que empregam madeira serrada para

fins estruturais, por exemplo, podem apropriar-se do ensaio dinâmico para identificar as melhores peças do lote e direcioná-las para as posições onde ocorrem as maiores solicitações mecânicas. O mesmo procedimento poder ser utilizado no contexto de dormentes ferroviários de madeira, permitindo direcionar as peças de melhor performance mecânica para as posições mais críticas, como por exemplo, os trechos de curva das ferrovias.

Como lado negativo do ensaio de endentação dinâmica, poderia ser citada a necessidade de calibração de modelos de regressão específicos, principalmente quando empregado para avaliação de propriedades físico-mecânicas de painéis MDP e pisos laminados. Essa desvantagem, contudo, não desabona o uso da metodologia. Diversos equipamentos que são comercializados atualmente também dependem de tarefas de calibração, como, por exemplo, os medidores de umidade da madeira, ou, até mesmo, os modernos equipamentos de espectroscopia do infravermelho próximo (NIRS), cujos resultados são estritamente vinculados a um processo avançado de calibração de modelos de regressão múltipla.

Os processos de seleção de parâmetros característicos do ensaio dinâmico e de modelagem, realizados satisfatoriamente neste trabalho por meio do método estatístico Stepwise, podem ser objeto de estudos futuros, utilizando-se outros métodos estatísticos, além dos que já foram testados ou, ainda, sistemas de aprendizagem de máquina, como redes neurais artificiais, por exemplo.

Investigações futuras também podem avançar num entendimento mais detalhado do fenômeno de endentação dinâmica, principalmente para madeira, estabelecendo-se relações de causa-efeito entre os parâmetros característicos do ensaio com as propriedades físico-mecânicas do material. Para painéis MDP e pisos laminados foram encontradas respostas muito particularizadas dos parâmetros do ensaio dinâmico para cada categoria de painel, indicando, possivelmente, que estudos futuros para nestes materiais devam ser mais direcionados para as ferramentas estatísticas de seleção de parâmetros e modelagem do que nas relações causa-efeito entre parâmetros do ensaio e as propriedades do material.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, R. P. Sinais digitais de um durômetro portátil para a estimativa de propriedades de madeiras para dormentes. 2015. ix, 86 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/136724>>.
- ASSIS, A. A. Desenvolvimento de um durômetro portátil para madeiras com o uso de transdutor de deslocamento. 2015. ix, 76 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/131951>>.
- BALLARIN, A. et al. Portable hardness tester for timber classification. In: WCTE 2010-World Conference on Timber Engineering. 2010. p. 20-24.
- BESLIU, S.; GHEORGHE, G. U. T. T.; AMARIEI, S. Contributions to a method and a new technique for determination of some important mechanical properties of massive wood texture. Food and Environment Safety Journal, v. 14, n. 1, 2015.
- COLENCI, R. A. Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário. 2006. iii, 83 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101773>>.
- DOYLE, J. The hardness of wood. Ph.D.- Thesis, University of Canterbury, Christchurch, N.Z. 1980.
- 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. 1.
- 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.