

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/07/2023

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until July 29, 2023

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.

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.

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.