



RELAÇÃO ENTRE A TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA E A RESISTÊNCIA A PERFURAÇÃO COM A VARIÇÃO DE DENSIDADE EM DISCOS DE MADEIRA BIODETERIORADOS

Matheus B. Garrido, Raquel Gonçalves, Mariana Nagle dos Reis

Resumo

As árvores possuem valor inestimável para o bem-estar da população, principalmente aquelas presentes nos centros urbanos, sendo, portanto, imprescindível sua preservação nesses espaços. Uma vez que nas cidades nem sempre é possível manter as condições ideais para seu desenvolvimento, as árvores podem apresentar risco de queda. Assim, é importante quantificar esse risco e, também, inferir quando poderá ocorrer uma falha. A resistência a perfuração e a tomografia acústica têm sido utilizadas para a inferência do risco de queda de árvores, mas há poucos trabalhos que quantificam as relações entre os resultados obtidos por essas ferramentas e os efetivos valores de propriedades da madeira. O objetivo dessa pesquisa foi caracterizar a densidade do lenho sadio e afetado por processos de biodeterioração e avaliar a associação da tomografia ultrassônica e da resistência a perfuração com essa densidade. Os ensaios foram realizados em árvores de *Cenostigma pluviosum* (Sibipiruna), do campus de Campinas da Unicamp, com diferentes tipos e estágios de biodeterioração. Os resultados permitiram concluir que a densidade das diferentes regiões do tronco varia, sendo maiores no cerne, intermediárias no alborno e baixas em zonas com biodeterioração. Essas variações foram coerentes com as amplitudes de resistência a perfuração obtidas nessas mesmas regiões e ambas foram coerentes com as imagens tomográficas.

Palavras-chave: densidade aparente saturada; densidade básica; amplitude de resistência a perfuração; velocidade de propagação de ondas de ultrassom

INTRODUÇÃO

A densidade é uma das propriedades mais utilizadas para a caracterização mecânica da madeira e é, também, importante para a utilização de métodos não destrutivos baseados em propagação de ondas, já que permite, quando associada com a velocidade de propagação, o cálculo do coeficiente de rigidez da madeira (Bucur 2006). No entanto, apesar de já terem sido demonstradas correlações significativas entre a densidade e propriedades de resistência e de rigidez da madeira (Dias e Rocco Lahr 2004), o mesmo não é esperado para a correlação entre a velocidade de propagação de ondas de ultrassom e a densidade da madeira, pois no caso desse ensaio, o fator preponderante é a estrutura interna do material (Bucur 2006).

No caso de madeira deteriorada, principalmente por fungos, o lenho torna-se menos resistente e menos rígido (Brazolin et al. 2014), sendo esperadas, portanto, reduções de densidade. Também é possível esperar que tais reduções de rigidez sejam acompanhadas por reduções de velocidade de propagação de ondas (Deflorio et al. 2007) sendo, portanto, possível esperar associação com a perda de densidade.

A resistência à perfuração é um ensaio semi-destrutivo no qual uma broca com cerca de 3 mm de diâmetro é inserida no lenho. O ensaio tem sido utilizado por muitos pesquisadores para identificar zonas deterioradas em estruturas de madeira (Brashaw et al. 2011; Tannert et al. 2013, Rinn 2012), toras (Wang et al. 2005 apud Nutto & Biechele 2015) ou árvores (Kubus 2009, Johnstone et al. 2007, Wang et al. 2008). Considerando que o equipamento mede a resistência oferecida pela madeira a perfuração, é esperado que esse resultado possa ser correlacionado com perdas de resistência devidas à deterioração e com perdas de densidade.

Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo caracterizar a densidade do lenho sadio e afetado por processos de biodeterioração e avaliar a associação da tomografia ultrassônica e da resistência a perfuração com essa densidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios consistiram na obtenção da resistência a perfuração, por meio do equipamento Resistógrafo IML-Resi-F400, (IML, Alemanha – Figura 1); da tomografia ultrassônica, por meio do equipamento USLab (Agricef, Brasil – Figura 2), e da densidade através da mensuração das dimensões e dos pesos de corpos de prova em laboratório.



Figura 1: equipamento de resistencia à perfuração IML-Resi-F400



Figura 2: Equipamento de ultrassom UsLab

Os ensaios de ultrassom foram realizados nas árvores ainda em pé no campus da Unicamp. Para elaboração da imagem de tomografia ultrassônica foram utilizadas medições em campo com malhas de difração de 8 pontos. As imagens tomográficas dos discos foram obtidas utilizando-se quatro faixas de velocidades representando: redução de até 36% da velocidade máxima do disco, que corresponde ao oco encontrado na amostra (preto); uma faixa de redução de 36% a 50% da velocidade máxima do disco referente à deterioração severa (vermelho), uma faixa de 50% a 80% da velocidade máxima referente ao cerne (marrom) e uma faixa de 80% a 100% correspondente ao alburno (amarelo).

Posteriormente, as árvores foram suprimidas para prosseguimento das demais etapas. Dessa forma, foram realizados os ensaios de resistência à perfuração. Neste ensaio, quanto maior a resistência que a madeira oferece para a inserção da broca, maior a energia requerida, que é apresentada na forma de um gráfico de amplitude. É esperado que essa amplitude se correlacione com o estado fitossanitário do lenho e com sua densidade.

Para melhor visualização foram confeccionadas máscaras identificando as diferentes regiões por cores. E por fim foram confeccionados corpos de prova prismáticos (Figura 4) retirados de diferentes regiões (Figura 3), os quais foram utilizados para a determinação da densidade em regiões sadias e biodeterioradas. Durante o projeto foram realizados ensaios em nove discos de cinco árvores diferentes.

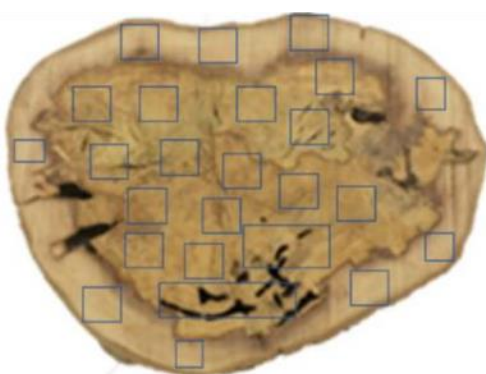


Figura 3. Exemplo de distribuição de corpos de prova em zonas com diferentes tipos e níveis de deterioração

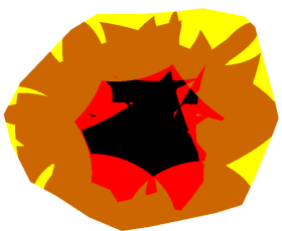

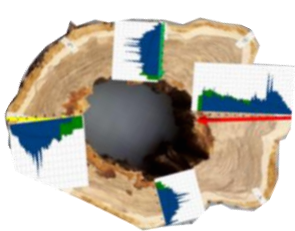


Figura 4: corpos de prova prismáticos identificados segundo sua posição no disco

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo em vista que o número de imagens geradas é muito grande para serem apresentadas em sua totalidade, utilizaremos apenas uma imagem de cada processo a fim de exemplificar o que foi realizado. As imagens tomográficas permitiram inferir as diferentes regiões encontradas nos discos (Tabela 1). Observa-se que as maiores velocidades são correspondentes às regiões de madeira mais sadia e as menores velocidades representam regiões com deterioração (Tabela 1), coerente com o esperado.

Tabela 1. Imagens tomográficas, máscaras de densidade e sobreposição da resistência a perfuração referentes às diferentes regiões dos discos.

Disco	Imagem tomográfica	Máscaras de densidades	Sobreposição da resistência a perfuração
349 DAS	 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>Velocidade (m.s-1)</p> <ul style="list-style-type: none"> 363 - 1159 1160 - 1608 1609 - 2575 2576 - 3219 </div> </div>	 <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>Densidade Básica (m³/kg)</p> <ul style="list-style-type: none"> A 656,4 C1 713,8 C2 714,5 B 635,3 </div> <div> <p>Densidade Saturada (m³/kg)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1179,2 1209,7 1221,3 1162,3 </div> </div>	

Os gráficos de resistência à perfuração permitiram identificar mudanças de amplitude ao longo do percurso da broca. A sobreposição do gráfico de resistência à perfuração às fotografias da superfície dos discos (Tabela 1) mostram que no alburno (região de madeira mais jovem, cujas células têm função de transporte de seiva quando na árvore viva, em geral apresenta parede celular mais fina e lúmen maior) as amplitudes foram menos elevadas; no cerne (região com células sem função de transporte de seiva e lúmen preenchido por extrativos) com amplitude mais elevada e, por fim, nas deteriorações, com amplitudes médias muito baixas. O equipamento também permite a identificação de ocos, zerando a amplitude. Quando o oco é de grandes dimensões, para evitar a quebra da agulha utilizada na perfuração, o equipamento, ao não identificar resistência no percurso, automaticamente recolhe a broca após alguns centímetros sem encontrar material sólido.

Analisando de forma comparativa os gráficos da resistência a perfuração (amplitudes) e as imagens tomográficas, é possível dizer que as imagens tomográficas foram eficientes na identificação de ocos, da medula e de deteriorações, uma vez que as velocidades de tais regiões foram bem menores do que as velocidades encontradas em regiões de madeira sadia, coincidindo também com as menores amplitudes dos gráficos.

Os valores médios de amplitude apresentaram valores diferenciados nas diferentes regiões dos discos (Tabela 2). A amplitude média da região de alburno foi de 21,2% com coeficiente de variação de 25,5%. A amplitude média da região de cerne foi de 36% com coeficiente de variação de 34,2%; aproximadamente 40% mais alta do que a região de alburno, e maior variabilidade. Para a região de biodeterioração foi muito interessante analisar que houve uma amplitude média de 4,4%, muito inferior às demais regiões, e com coeficiente de variação 27,3%, entre as obtidas para as regiões do alburno e do cerne (Tabela 2).

Comparando esses resultados com os dados médios obtidos para a densidade básica (Tabela 2), é possível verificar que há bastante coerência, mas as diferenças foram bem menores do que as verificadas para a amplitude. Os maiores valores também foram obtidos na região de Cerne, os valores intermediários na região do Alburno (cerca de 6,5% menores que no cerne) e os menores na região deteriorada (cerca de 15% menores que no cerne). Observa-se maior variabilidade para as densidades obtidas na região deteriorada. Para a densidade aparente saturada densidade da região deteriorada foi praticamente igual à região de alburno e apenas cerca de 4% inferior ao cerne.

Tabela 2. Valores de densidade básica e saturada e amplitudes médias das regiões do alburno (A), do cerne (C) e da deterioração (D).

Árvore	Densidade Básica			Densidade Saturada			Amplitude Média			Amplitude Média*
	A	C	D	A	C	D	A	C	D	C
346 DAP	690	775		1182	1238		18,2%	45,9%		50,6%
346 DAS	716	787		1172	1226		25,9%	29,0%		40,7%
347 DAP	684	692		1170	1212		16,1%	26,2%		30,0%
347 DAS 1	711	771		1166	1247		20,1%	30,4%		40,6%
347 DAS 2	676	734		1156	1232					
348 DAP	658	733	780	1172	1233	1253	21,5%	35,6%	3,2%	
348 DAS	750	744		1210	1219		28,7%	30,4%		57,0%
349 DAS	656	714	635	1179	1216	1162	20,1%	39,8%	5,5%	
349 H	643	661	481	1158	1197	1080	12,5%	23,9%	4,5%	
351 DAS	563	603	608	1227	1255	1227	27,4%	63,2%		
Média geral	675	720	626	1182	1227	1181	21,2%	36,0%	4,4%	43,8%
Desvio padrão	53,7	60,0	122,7	22,4	18,1	77,5	5,4%	12,3%	1,2%	10,4%
Coefficiente de variação (%)	8,0	8,3	19,6	1,9	1,5	6,6	25,5	34,2	27,3	23,7

*Sem considerar os valores obtidos na região da medula

CONCLUSÃO

A densidade das diferentes regiões do tronco varia, sendo maiores no cerne, intermediárias no alburno e baixas em zonas com biodeterioração, sendo as diferenciações mais evidentes para a densidade básica do que para a densidade aparente na condição saturada. Essas variações foram coerentes com as amplitudes de resistência a perfuração obtidas nessas mesmas regiões e ambas foram coerentes com as imagens tomográficas.

AGREDECIMENTOS

À Profa. Dra. Raquel Gonçalves e a Mariana Nagle dos Reis pela oportunidade e pela partilha de conhecimentos.

À equipe do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos por todo o apoio durante a realização desta pesquisa.

Por fim ao CNPQ pela concessão da bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Brashaw, B. K.; Vatalaro, R.; Ross, R. J.; Wang, X.; Schmieding, S.; Okstad, W. (2011) Historic Log Cabin structural condition assessment and rehabilitation – A case study. In: International nondestructive testing and evaluation of wood symposium, 17, Hungria. Anais... Hungria: University of West Hungary, v.2, p. 505-512

Brazolin, s.; Tomazello filho, m.; Yojo, t.; Neto, m.a.o.; Albuquerque, a.r.; Junior, c.r.s; (2014) Propriedades físico-mecânicas do lenho deteriorado por fungos apodrecedores de árvores de tipuana tipu, **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 183-190

Bucur V. Acoustics of wood. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 393p, 2006

- Dias, F.M.; Rocco Lahr, F. A. (2004). Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis** 65: 102-113.
- Deflorio, G; Fink, S; Schwarze, F.W.M.R.; (2007) Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. *Wood Sci Technol.* 42:117-132.
- Johnstone, D. M.; Ades, P. K.; Moore, G. M.; Smith, I. W. (2007) Predicting Wood Decay in Eucalypts Using an Expert System and the IML- Resistograph Drill. **Arboriculture & Urban Forestry**, 33(2), p. 76-82.
- Kubus, M. (2009) The Evaluation of Using Resistograph when Specifying the Health Condition of a Monumental Tree. **Notuale Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 37, n. 1, p. 157–164.
- Nutto, L.; Biechele, T. (2015) Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction – using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. In: International nondestructive testing and evaluation of wood symposium, 19 Anais... Brasil, Rio de Janeiro, p. 156-160.
- Rinn, F. (2012) Basics of Typical Resistance-Drilling for Timber Inspection. **Holztechnologie**, 53, p. 24-29
- Soriano, J., da Veiga, N. S., Martins, I. Z. (2015) Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**,73(6), 753-758.
- Tannert, T.; Anthony, R.W.; Kasal, B.; Kloiber, M.; Piazza, M.; Riggio, M.; Rinn, F.; Widmann, R.; Yamaguchi, N. (2013): In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. **Materials and Structures** DOI 10.1617/s11527-013-0094-5. July 2013.
- Wang, X.; Allison, R.B. (2008) Decay Detection in Red Oak Trees Using a Combination of Visual Inspection, Acoustic Testing, and Resistance Microdrilling. **Arboriculture & Urban Forestry**, 34(1), p. 1-4