

Avaliação da distribuição da densidade em MDF a partir da técnica da onda de ultra-som

Evaluation of the density distribution in MDF's using ultrasonic wave technique

Sérgio Augusto Mello da Silva¹, Raquel Gonçalves²

Resumo

Este trabalho teve como objetivo utilizar a técnica de ultra-som para avaliar a densidade em chapas de fibra do tipo MDF, confeccionadas com poliuretano mono-componente à base de óleo de mamona. Os ensaios de ultra-som foram realizados com equipamento da marca Steinkamp, modelo BP7, com transdutores de faces exponenciais e planas de 45 kHz de frequência, posicionados em varias regiões das chapas para determinação das velocidades das ondas ultra-sônicas. As chapas foram confeccionadas com fibras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* no Laboratório de Controle de Qualidade e Desenvolvimento de Produtos da Duratex, nas dimensões de 500 mm de comprimento, 500 mm de largura, 8 e 15 mm de espessura. Três chapas para cada espécie de fibra e espessura foram manufaturadas, totalizando doze (12) chapas ensaiadas. Essas chapas foram produzidas com adição de 5% de poliuretano às fibras, na temperatura de prensagem de 160 °C, pressão de prensagem de 53 bar e adição de 12% de umidade às fibras. Para determinação das densidades, foram retirados corpos-de-prova das regiões das chapas onde foram determinadas as velocidades das ondas ultra-sônicas, utilizando-se o equipamento de Raios-X do tipo DA-X. A análise estatística empregada demonstrou haver forte relação entre as velocidades de propagação das ondas ultra-sônicas e as densidades das chapas, permitindo concluir que o método de ultra-som tem potencialidade para a avaliação da densidade das chapas do tipo MDF.

Palavras-chave: Chapas de média densidade, Avaliação não-destrutiva, Onda ultra-sônica

Abstract

The goal of this research was to determine the density distribution in medium density fiberboard (MDF), manufactured with polyurethane derived from castor oil using, ultrasonic wave technique. The equipment used in this test is Steinkamp BP7 with plan and exponential transducers, both with 45 kHz frequencies, located in several zones on the plate in order to determine wave ultrasonic velocity. The *Pinus caribaea* and *Eucalyptus grandis* fiberboard were manufactured in the quality control and products development laboratory of Duratex with 500 mm long, 500 mm large, 8 and 15 mm of thickness. Three MDF for each fiber specimen and thickness were fabricated, totalizing twelve plates tested. The MDF were produced with 5% polyurethane addition, in temperature of 160 °C, tension press of 53 bars and addition of moisture content of 12%. For determination of fiberboard density, samples were extracted from the same zones where the wave ultrasonic velocity was determined. In this case, DAX-Ray equipment was used. Statistical analysis shows good agreement with wave ultrasonic velocity and the density profile, validating the application of non-destructive technique in order to determine the density profile of MDF's.

Keywords: Medium density fiberboard, Non-destructive test, Ultrasonic wave

INTRODUÇÃO

A densidade, nas chapas de fibra de madeira do tipo MDF, é uma das mais importantes propriedades na classificação do uso comercial desse material. Os MDF são produtos projetados para serem fabricados com densidades entre 0,5 e 0,8 g/cm³ e a variação da densidade deve ser verificada por meio de ensaios que forneçam resultados precisos e rápidos. No setor brasilei-

ro de produção industrial de MDF, as empresas utilizam, normalmente, medidores de perfis de densidade com sistema Rádio Isótopo e medidores com sistema de Raio X. Esses equipamentos possibilitam a determinação do perfil de densidade na espessura de corpos-de-prova extraídos de chapas escolhidas aleatoriamente da linha de produção, mas sua aplicação é trabalhosa.

Diferentes técnicas não-destrutivas têm sido utilizadas na avaliação de compósitos à base de

¹Professor do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – Av. Brasil-Centro, 56 – Caixa Postal 31 – Ilha Solteira, SP – 15378-000 – E-mail: sams@dec.feis.unesp.br

²Professora do Conselho Integrado de Infra-Estrutura Rural da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas – Caixa Postal 6011 – Campinas, SP – 13083-970 – E-mail: raquel@agr.unicamp.br

madeira, principalmente no que se refere à avaliação da qualidade e de propriedades mecânicas. Esses estudos visam aumentar a eficiência da avaliação do material na linha de produção.

Wang *et al.* (2005) realizaram ensaios para determinação da variação da densidade nas chapas utilizando sistema de varredura horizontal na superfície das chapas com equipamento comercial de Raios-X do tipo VSX9811, sistema de varredura vertical na espessura das chapas com equipamento de Raios-X QMS do tipo QDO-01 e sistema de determinação da densidade (massa/volume) proposto pela ASTM D1037. Foram avaliadas chapas de fibra de média densidade (MDF), chapas de partículas orientadas (OSB) e chapas de partículas (PB). Os resultados foram submetidos à análise de regressão e obtidos coeficientes de determinação R^2 em torno de 0,8 para as correlações entre os perfis de densidade (sistema Raios-X QMS do tipo QDO-01) e as densidades (método ASTM); com exceção das chapas MDF que apresentaram baixos coeficientes de determinação (R^2 em torno de 0,4). Foram encontradas correlações muito fracas para o sistema de varredura horizontal utilizando equipamento de Raios-X VSX9811 devido à baixa resolução da imagem do sistema, havendo necessidade de melhorar a sensibilidade do equipamento e adequá-lo para a varredura de chapas derivadas de madeira.

Kazemi Najafi e Ebrahimi (2005) realizaram estudos em chapas de partículas (PB) e de fibras (FB) de madeira para avaliar a influência do alinhamento das partículas e fibras (entre ângulos de 0° a 90°) na eficiência da propagação da velocidade das ondas ultra-sônicas. Os ensaios foram realizados com equipamento de ultra-som da marca Sylvatest, com transdutores cônicos piezelétricos exponenciais de 16 kHz de frequência pulsando ondas longitudinais. Para o cálculo da velocidade de propagação das ondas entre os ângulos de 0° e 90° , foram utilizadas duas equações (Hankinson e Jacoby) e comparados com os valores das velocidades experimentais. As velocidades obtidas com as equações de Hankinson e Jacoby foram avaliadas estatisticamente por meio da Média dos Erros Absolutos. Essas velocidades foram correlacionadas com as velocidades experimentais e realizadas análises de regressão, tendo sido obtidos modelos quadráticos com coeficientes de determinação (R^2) entre 0.93 a 0.99 e, modelos cúbicos com R^2 entre 0.99 a 1.00. Os valores de R^2 permitiram, aos autores, concluir que as equações de Hankinson

e Jacoby podem ser utilizadas para prever as velocidades das ondas ultra-sônicas em intervalos de ângulos entre 00 a 900 . Além disso, os autores observaram haver coerência da velocidade obtida com as características do material (fibras e partículas de madeira) e que, portanto, a velocidade de propagação das ondas de ultra-som é parâmetro representativo em avaliações do composto.

O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência da utilização da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na avaliação da distribuição da densidade em chapas de média densidade (MDF).

MATERIAL E MÉTODOS

Os MDF foram confeccionados no Laboratório de Controle de Qualidade e Desenvolvimento de Produtos das Indústrias Duratex com base no manual de procedimentos técnicos 1 e 2 da EMB EuroMDFBoard (1995), para confecção e caracterização de MDF produzidos industrialmente.

As chapas foram confeccionadas com fibras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*, nas dimensões 500 mm de comprimento, 500 mm de largura, 8 e 15 mm de espessura. Para cada espécie de fibra foram confeccionadas 6 chapas, 3 de cada espessura. As chapas foram produzidas empregando-se 5% de adesivo poliuretano mono-componente à base de óleo de mamona; 160°C de temperatura de prensagem, 53 bar de pressão de prensagem e 12% de umidade nas fibras.

Primeiramente foram realizados os procedimentos experimentais para determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica nas chapas de fibra, utilizando-se equipamento de ultra-som da marca Steinkamp, modelo BP7, com transdutores exponenciais e planos de 45 kHz. Esses transdutores foram posicionados nas regiões das chapas de onde os corpos-de-prova a serem utilizados para a determinação da densidade seriam retirados. As figuras 1, 2 e 3 ilustram o posicionamento dos transdutores.

Após os ensaios com ultra-som, de cada uma das chapas extraíram-se 24 corpos-de-prova com dimensões nominais 50 mm x 50 mm, totalizando assim 72 corpos-de-prova de 8 mm de espessura e 72 de 15 mm de espessura, os quais foram utilizados para a determinação da densidade.

Em seguida os corpos-de-prova foram ensaia-

dos para determinar-se a densidade, utilizando-se o equipamento DA-X que estima a atenuação dos Raios - X ao longo da espessura. Este método é capaz de captar as diferenças de densidade dos MDF (mais densos nas proximidades das superfícies, em decorrência do processo de produção) por meio do grau de absorção de Raio - X. Deste modo foi possível traçar o perfil da densidade em relação à espessura e determinar a densidade média dos corpos-de-prova e, por inferência, das chapas produzidas.

As Figuras 1 e 2 ilustram os transdutores exponenciais e planos sendo aplicados na maior dimensão das chapas (plano longitudinal) e a Figura 3 ilustra os transdutores planos sendo aplicado na menor dimensão das chapas (plano transversal). Com a utilização dos transdutores exponenciais e planos determinaram-se as velocidades das ondas ultra-sônicas a partir de transdutores exponenciais (VOTE) e as velocidades das ondas ultra-sônicas a partir de transdutores planos (VOTP).

O emprego dos transdutores possibilita determinar o tempo de propagação das ondas ultra-sônicas nas chapas, sendo necessário para determinação da velocidade à utilização da equação $V = S/t$, onde V é a velocidade (m/s), S é o comprimento do corpo-de-prova (m) e t é o tempo de propagação da onda (μ s).

Os resultados obtidos foram avaliados por meio de análise de regressão múltipla e linear com nível de confiança de 95% (nível de significação de 0,05%).

As velocidades das ondas ultra-sônicas determinadas a partir dos transdutores exponenciais (VOTE) e planos (VOTP) aplicados no plano longitudinal das chapas foram relacionadas com as médias aritméticas das densidades (DENS) dos corpos-de-prova de cada região (A,B,C,D,E,F - Figura 1 e 2) das chapas, considerando-se 3 chapas para cada espessura (8 e 15 mm), foram ensaiados 18 corpos-de-prova por espessura, totalizando 36 corpos-de-prova para as duas espessuras. As velocidades das ondas ultra-sônicas determinadas a partir dos transdutores planos (VOTP) aplicados no plano transversal das chapas (regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 - figura 3) foram relacionadas com as densidades (DENS) determinadas nos 24 corpos-de-prova extraídos de cada chapa, ou seja, considerando-se 3 chapas por espessura (8 e 15 mm), foram ensaiados 72 corpos-de-prova para cada conjunto de chapas por espessura, totalizando para as duas espessuras 144 corpos-de-prova ensaiados.

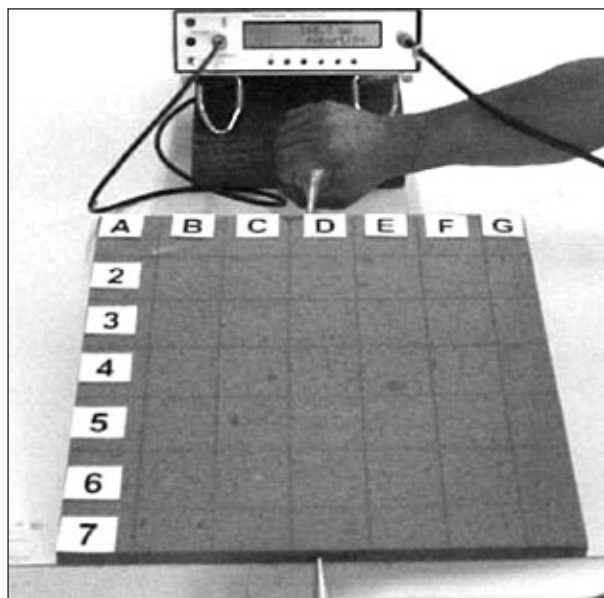


Figura 1. Posicionamento dos transdutores exponenciais para determinação das velocidades de propagação das ondas ultra-sônicas (VOTE) no plano longitudinal da chapa. (Location of the exponential transducers to determine the ultra-sonic wave propagation velocity (VOTE) in the board longitudinal plan)

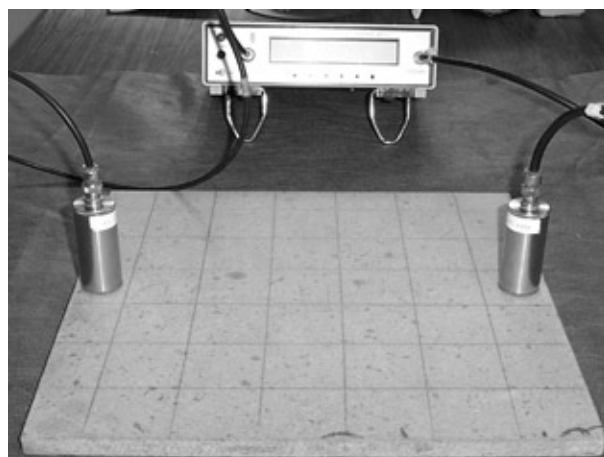


Figura 2. Posicionamento dos transdutores planos para determinação das velocidades ultra-sônicas (VOTP) no plano longitudinal da chapa. (Location of the plane transducers to determine the ultra-sonic wave propagation velocity (VOTP) in the board longitudinal plan)

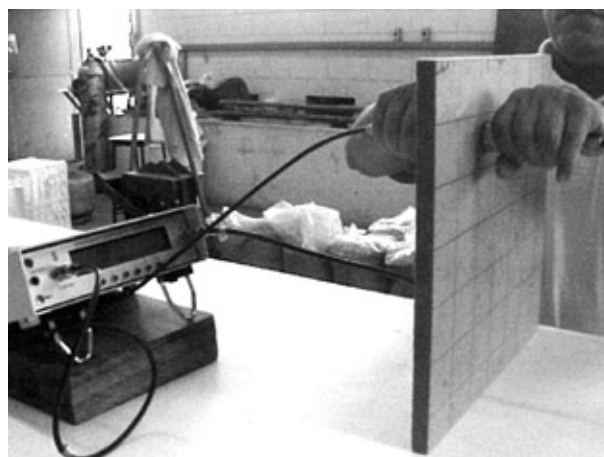


Figura 3. Posicionamento dos transdutores planos para determinação da velocidade das ondas ultra-sônicas (VOTP) no plano transversal da chapa. (Location of the plane transducers to determine the ultra-sonic wave propagation velocity (VOTP) in the board transversal plan)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam as velocidades das ondas ultra-sônicas obtidas a partir dos

transdutores exponenciais e planos aplicados nos planos longitudinal e transversal das chapas de Pinus (P) e Eucalipto (E) com 8 e 15 mm de espessura.

Tabela 1. Velocidades das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores exponenciais (VOTE) e planos (VOTP) aplicados no plano longitudinal das chapas de pinus e eucalipto com 8 e 15 mm de espessura. (Ultra-sonic wave velocity obtained using exponential (VOTE) and plane transducer (VOTP) in the longitudinal and transversal plan of board from eucalyptus and pines with 8 and 15mm thickness)

		VOTE (µm/s)				VOTP (µm/s)			
		P8	P15	E8	E15	P8	P15	E8	E15
CP1	A	2181	2284	2258	2068	2500	2269	2377	2704
	B	2201	2289	2309	2076	2541	2332	2509	2768
	C	2267	2303	2321	2103	2610	2358	2558	2772
	D	2270	2272	2272	2107	2560	2358	2533	2788
	E	2231	2222	2231	2154	2528	2356	2429	2752
	F	2210	2155	2230	2157	2419	2256	2366	2572
CP2	A	2271	2254	2177	2158	2563	2428	2467	2558
	B	2286	2315	2298	2177	2602	2445	2513	2688
	C	2323	2331	2318	2179	2646	2469	2538	2780
	D	2318	2303	2267	2178	2573	2487	2515	2746
	E	2315	2275	2263	2179	2435	2422	2446	2726
	F	2283	2234	2160	2183	2421	2401	2432	2715
CP3	A	2326	2186	2235	2199	2528	2404	2473	2741
	B	2331	2259	2303	2204	2586	2413	2525	2649
	C	2334	2327	2333	2205	2638	2508	2562	2839
	D	2337	2275	2315	2211	2588	2509	2589	2797
	E	2337	2199	2290	2214	2554	2415	2498	2645
	F	-	-	2217	-	-	-	2456	-
ME		2284	2264	2266	2162	2547	2402	2488	2720

Onde: VOTE é a velocidade das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores exponenciais determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F das chapas, conforme ilustrado na figuras 1; VOTP é a Velocidade das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores planos determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F das chapas, conforme ilustrado na figura 2; P8 e P15 representam as chapas de pinus com 8 e 15 mm de espessura; E8 e E15 representam as chapas de eucalipto com 8 e 15mm de espessura; CP1,CP2,CP3 representam as chapas 1, 2 e 3; ME é a média aritmética das velocidades das ondas ultra-sônicas das 3 chapas determinadas em função de suas espessuras.

Tabela 2. Velocidades das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores planos (VOTP) aplicados no plano transversal das chapas de pinus com 8 e 15 mm de espessura. (Ultra-sonic wave velocity obtained using plane transducer (VOTP) in the transversal plan of pines board with 8 and 15mm thickness)

		VOTP (µm/s)				MR	VOTP (µm/s)				MR
		P8					P15				
		3	4	5	6		3	4	5	6	
CP1	A	906	989	1012	1024	983	882	898	993	877	913
	B	916	1074	1115	1074	1045	829	955	1007	882	918
	C	926	1088	1115	1115	1061	909	926	1020	926	945
	D	956	1024	1101	1048	1032	820	920	968	932	910
	E	935	1024	1074	989	1005	798	898	926	926	887
	F	784	888	946	879	874	714	758	872	777	780
CP2	A	967	1145	1176	1101	1097	909	974	938	867	922
	B	1012	1061	1225	1048	1087	915	1020	1049	920	976
	C	1000	1036	1225	1160	1105	920	1027	1042	1000	997
	D	935	1036	1208	1061	1060	926	974	1103	962	991
	E	897	967	1088	967	979	862	962	1000	909	933
	F	750	798	989	821	839	758	882	938	862	860
CP3	A	861	926	1115	1036	985	794	843	852	852	835
	B	906	1024	1208	1176	1078	872	938	993	888	923
	C	888	1088	1261	1208	1111	888	1000	993	962	961
	D	946	1048	1299	1088	1095	877	955	962	920	929
	E	946	1012	1101	1115	1043	852	1020	968	893	933
	F	737	837	1000	926	875	773	857	920	833	846
ME		1020					914				

Onde: VOTP é a velocidade das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores planos determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 das chapas, conforme ilustrado nas figuras 1 e 3; CP1,CP2,CP3 representam as chapas 1, 2 e 3; P8,P15 representam as chapas de pinus com 8 e 15 mm de espessura; ME é a média aritmética das velocidades das ondas ultra-sônicas das 3 chapas determinadas em função de sua espessura; MR é a média aritmética das velocidades das ondas ultra-sônicas determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 de cada chapa.

Tabela 3. Velocidades das ondas ultra-sônicas obtidas a partir de transdutores planos (VOTP) aplicados no plano transversal das chapas de eucalipto com 8 e 15 mm de espessura. (Ultra-sonic wave velocity obtained using plane transducer (VOTP) in the transversal plan of eucalyptus board with 8 and 15mm thickness)

		VOTP				MR	VOTP				MR
		E8					E15				
		3	4	5	6		3	4	5	6	
CP1	A	1027	1052	1015	1106	1050	867	887	972	966	923
	B	1079	1136	1182	1215	1153	948	908	1017	1011	971
	C	1052	1182	1136	1215	1146	903	960	991	1017	968
	D	1092	1199	1106	1182	1145	877	930	948	978	933
	E	1065	1092	1106	1182	1112	862	872	914	948	899
	F	1027	1136	1079	1106	1087	771	807	803	887	817
CP2	A	1027	1027	1040	1092	1047	872	925	898	925	905
	B	1106	1166	1106	1136	1129	882	925	972	972	938
	C	1027	1151	1079	1151	1102	848	936	948	972	926
	D	1079	1136	992	1136	1085	848	930	930	966	919
	E	1027	1092	948	1136	1051	862	898	903	908	893
	F	918	1015	899	1079	978	730	812	834	838	804
CP3	A	981	1136	830	1040	996	848	925	942	942	914
	B	1092	1136	928	1052	1074	882	936	892	1017	932
	C	1182	1199	1015	1106	1096	930	972	930	1017	963
	D	1151	1182	1027	1136	1093	882	930	882	972	917
	E	1136	1151	948	1136	1132	877	936	825	892	883
	F	1079	1151	918	1065	1053	730	829	744	812	779
ME		1085					905				

Onde: VOTP é a velocidade das ondas de compressão determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 das chapas, conforme ilustrado nas figuras 1 e 3; CP1,CP2,CP3 representam as chapas 1, 2 e 3; E8,E15 representam as chapas de eucalipto com 8 e 15 mm de espessura; ME é a média aritmética das velocidades das ondas ultra-sônicas das 3 chapas determinadas em função de sua espessura; MR é a média aritmética das velocidades das ondas ultra-sônicas determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 de cada chapa.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 observa-se, geralmente, que as velocidades das ondas ultra-sônicas são menores nas regiões da borda (A e F) das chapas e maiores no centro (C e D). Esse fato é decorrente da expansão de gases no interior das chapas, devido à reação da temperatura com o adesivo, provocando a diminuição da força de adesão entre as fibras nas regiões das bordas,

conseqüentemente, influenciando a diminuição da densidade. A maior adesão entre as fibras proporciona maior densidade às chapas e facilita a propagação das ondas ultra-sônicas.

As Tabelas 4 e 5 apresentam as densidades determinadas com equipamento de Raios-X nas chapas de pinus e eucalipto com 8 e 15 mm de espessura.

Tabela 4. Densidades das chapas de pinus com 8 e 15 mm de espessura determinadas com equipamento de Raios-X. (Density of pines board with 8 and 15 mm thickness determined using X-ray)

		DENS (g/cm ³)				MR	DENS (g/cm ³)				MR
		P8					P15				
		3	4	5	6		3	4	5	6	
CP1	A	0,67	0,66	0,79	0,78	0,73	0,68	0,71	0,72	0,69	0,70
	B	0,72	0,75	0,72	0,70	0,72	0,70	0,74	0,77	0,74	0,74
	C	0,75	0,77	0,75	0,73	0,75	0,70	0,74	0,76	0,72	0,73
	D	0,76	0,77	0,70	0,78	0,75	0,72	0,75	0,80	0,75	0,76
	E	0,73	0,74	0,75	0,76	0,75	0,73	0,77	0,75	0,74	0,75
	F	0,69	0,73	0,77	0,69	0,72	0,71	0,70	0,72	0,73	0,72
CP2	A	0,75	0,78	0,73	0,77	0,76	0,74	0,76	0,75	0,77	0,76
	B	0,77	0,79	0,77	0,80	0,78	0,76	0,77	0,77	0,78	0,77
	C	0,80	0,78	0,77	0,81	0,79	0,79	0,77	0,78	0,78	0,78
	D	0,73	0,78	0,77	0,80	0,77	0,74	0,74	0,78	0,78	0,76
	E	0,75	0,75	0,77	0,73	0,75	0,76	0,77	0,77	0,78	0,77
	F	0,75	0,76	0,77	0,75	0,76	0,75	0,77	0,74	0,78	0,76
CP3	A	0,75	0,79	0,82	0,75	0,78	0,74	0,76	0,77	0,75	0,76
	B	0,82	0,84	0,72	0,77	0,79	0,78	0,79	0,77	0,80	0,79
	C	0,81	0,78	0,79	0,77	0,79	0,76	0,77	0,8	0,81	0,79
	D	0,82	0,76	0,84	0,72	0,79	0,78	0,78	0,81	0,80	0,79
	E	0,80	0,77	0,75	0,79	0,78	0,76	0,78	0,79	0,78	0,78
ME		0,76					0,76				

Onde: DENS é a densidades das chapas de pinus determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 das chapas, conforme ilustrado nas figuras 1 e 3; CP1,CP2,CP3 representam as chapas 1, 2 e 3; P8,P15 representam as chapas de pinus com 8 e 15 mm de espessura; ME é a média aritmética das densidades das 3 chapas determinadas em função de sua espessura; MR é a média aritmética das densidades determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 de cada chapa.

Tabela 5. Densidades das chapas de eucalipto com 8 e 15 mm de espessura determinadas com equipamento de Raios-X. (Density of eucalyptus board with 8 and 15 mm thickness determined using X-ray)

	DENS (g/cm ³)				MR	DENS (g/cm ³)				MR	
	E8					E15					
	3	4	5	6		3	4	5	6		
CP1	A	0,73	0,74	0,75	0,75	0,74	0,70	0,70	0,68	0,77	0,71
	B	0,74	0,75	0,78	0,73	0,75	0,70	0,71	0,74	0,70	0,71
	C	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,69	0,72	0,73	0,74	0,72
	D	0,73	0,80	0,82	0,73	0,77	0,71	0,70	0,72	0,72	0,71
	E	0,75	0,73	0,83	0,78	0,77	0,70	0,71	0,70	0,70	0,70
	F	0,73	0,73	0,80	0,83	0,77	0,69	0,70	0,74	0,68	0,70
CP2	A	0,77	0,77	0,83	0,79	0,79	0,70	0,72	0,73	0,72	0,72
	B	0,78	0,81	0,78	0,76	0,78	0,74	0,72	0,72	0,73	0,73
	C	0,78	0,79	0,81	0,78	0,79	0,72	0,72	0,75	0,75	0,74
	D	0,81	0,78	0,84	0,73	0,79	0,72	0,74	0,75	0,73	0,74
	E	0,78	0,76	0,78	0,81	0,78	0,70	0,74	0,75	0,76	0,74
	F	0,75	0,75	0,77	0,77	0,76	0,72	0,73	0,75	0,73	0,73
CP3	A	0,78	0,75	0,77	0,76	0,77	0,74	0,74	0,76	0,71	0,74
	B	0,82	0,81	0,80	0,80	0,81	0,75	0,73	0,76	0,70	0,74
	C	0,80	0,82	0,81	0,82	0,81	0,73	0,75	0,76	0,76	0,75
	D	0,80	0,82	0,79	0,81	0,81	0,72	0,72	0,75	0,75	0,74
	E	0,78	0,78	0,81	0,80	0,79	0,72	0,77	0,75	0,74	0,75
	F	0,79	0,79	0,80	0,80	0,80	-	-	-	-	-
ME	0,78					0,73					

Onde: DENS é a densidades das chapas de eucalipto determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 das chapas, conforme ilustrado nas figuras 1 e 3; CP1,CP2,CP3 representam as chapas 1, 2 e 3; E8,E15 representam as chapas de eucalipto com 8 e 15 mm de espessura; ME é a média aritmética das densidades das 3 chapas determinadas em função de sua espessura; MR é a Média aritmética das densidades determinadas nas regiões A,B,C,D,E,F,3,4,5,6 de cada chapa.

É importante destacar que, apesar das variações observadas nas densidades, estas se mantêm em intervalos de 0,60 a 0,85 g/cm³, de acordo com as características das chapas do tipo MDF.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 observa-se que a variação da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas é similar à variação das densidades apresentadas nas Tabela 4 e 5, ou seja, quanto maior a densidade maior a velocidade.

Considerando-se a similaridade do comportamento observado entre as velocidades das ondas ultra-sônicas e as densidades das chapas, apresentadas nas Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5, as análises de regressão foram realizadas entre as velo-

cidade de propagação das ondas ultra-sônicas (VOTP). Estas foram obtidas a partir de transdutores planos aplicados no plano transversal das chapas e as respectivas densidades das chapas de pinus e eucalipto com 8 e 15 mm de espessura, pois, esses resultados representam um conjunto com um número maior de eventos.

Nas Tabelas de 6 a 9 estão apresentadas as análises de regressão realizadas entre os valores determinados para as velocidades das ondas ultra-sônicas (VOTP), obtidas a partir de transdutores planos aplicados no plano transversal das chapas e as respectivas densidades.

Tabela 6. Análise de regressão dos valores observados entre as velocidades das ondas ultra-sônicas (VOTP) obtidas a partir de transdutores planos aplicados no plano transversal das chapas de pinus com 8 mm de espessura e as suas respectivas densidades. (Regression analysis of observed values between the ultra-sonic waves (VOTP) obtained using plane transducers applied in the transversal plan of pines board with 8 mm thickness and its respective density)

R Múltiplo	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão	Obs		
0,9935	0,9870	0,9868	0,0052	72		
ANOVA	gl	SQ	MQ	F	F de significação	
Regressão	1	0,1457	0,1457	5316,2770	9,2030E ⁻⁶⁸	
Resíduo	70	0,0019	2,7403E ⁻⁰⁵			
Total	71	0,14760				
	Coefficientes	Erro Padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores
Interseção	0,38381	0,00526	73,0323	8,2182E ⁻⁶⁸	0,37332	0,39429
VOCP8	0,00037	0,00001	72,9128	9,2030E ⁻⁶⁸	0,00036	0,00038
DENSP8=0,0004VOTPP8+0,3838 R ² =99						

Tabela 7. Análise de regressão dos valores observados entre as velocidades das ondas ultra-sônicas (VOTP) obtidas a partir de transdutores planos aplicados na direção transversal das chapas de pinus com 15 mm de espessura e suas respectivas densidades. (Regression analysis of observed values between the ultra-sonic waves (VOTP) obtained using plane transducers applied in the transversal plan of pines board with 15 mm thickness and its respective density)

R Múltiplo	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão	Obs		
0,9954	0,9908	0,9907	0,0030	72		
ANOVA	gl	SQ	MQ	F	F de significação	
Regressão	1	0,0664	0,0664	7524,8386	5,4964E ⁻⁷³	
Resíduo	70	0,0006	8,8245E ⁻⁰⁶			
Total	71	0,0670				
Coeficientes		Erro Padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores
Interseção	0,3899	0,0042	91,8164	1,0664E ⁻⁷⁴	0,3814	0,3983
VOCP15	0,0004	4,6279E ⁻⁰⁶	86,7458	5,4964E ⁻⁷³	0,0004	0,0004
DENSP15 = 0,0004VOTPP15 + 0,3899 R ² = 99						

Tabela 8. Análise de regressão dos valores observados entre as velocidades das ondas ultra-sônicas (VOTP) obtidas a partir de transdutores planos aplicados no plano transversal das chapas de eucalipto com 8 mm de espessura e suas respectivas densidades. (Regression analysis of observed values between the ultra-sonic waves (VOTP) obtained using plane transducers applied in the transversal plan of eucalyptus board with 8 mm thickness and its respective density)

R Múltiplo	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão	Obs		
0,9896	0,9794	0,9791	0,0044	71		
ANOVA	gl	SQ	MQ	F	F de significação	
Regressão	1	0,0648	0,0648	3273,7244	6,9850E ⁻⁶⁰	
Resíduo	69	0,0014	1,9794E ⁻⁰⁵			
Total	70	0,0662				
Coeficientes		Erro Padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores
Interseção	0,3412	0,0077	44,2295	2,2649E ⁻⁵²	0,3258	0,3566
VOCE8	0,0004	7,0708E ⁻⁰⁶	57,2165	6,9850E ⁻⁶⁰	0,0004	0,0004
DENSE8 = 0,0004VOTPE8 + 0,3412 R ² = 0,98						

Tabela 9. Análise de regressão dos valores observados entre as velocidades das ondas ultra-sônicas (VOTP) obtidas a partir de transdutores planos aplicados no plano transversal das chapas de eucalipto com 15 mm de espessura e suas respectivas densidades. (Regression analysis of observed values between the ultra-sonic waves (VOTP) obtained using plane transducers applied in the transversal plan of eucalyptus board with 15 mm thickness and its respective density)

R Múltiplo	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Padrão	Obs		
0,9904	0,9809	0,9807	0,0041	72		
ANOVA	gl	SQ	MQ	F	F de significação	
Regressão	1	0,0605	0,0605	3602,0066	6,1477E ⁻⁶²	
Resíduo	70	0,0012	1,67864E ⁻⁰⁵			
Total	71	0,0616				
Coeficientes		Erro Padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores
Interseção	0,3319	0,0066	50,2076	1,2356E ⁻⁵⁶	0,3187	0,3451
VOCE15	0,0004	7,2886E ⁻⁰⁶	60,0167	6,1477E ⁻⁶²	0,0004	0,0005
DENSE15 = 0,0004VOTPE15 + 0,3319 R ² = 0,98						

No modelo de análises de regressão utilizado para avaliação da relação entre as velocidades das ondas ultra-sônicas e as densidades, observa-se que o F de significação é inferior ao nível de significação adotado (= 0,05), consequentemente a hipótese nula foi rejeitada e a regressão foi aceita. As relações entre velocidades e densidades apresentaram coeficientes de determinação (R²) tendendo para 1, indicando a possibilidade de inferir a densidade utilizando o parâmetro velocidade.

CONCLUSÕES

A variação das velocidades das ondas ultra-sônicas apresentou comportamento compatível e semelhante à variação das densidades nas chapas e a análise de regressão demonstrou ser possível inferir a densidade por meio da velocidade.

Dessa forma pode-se concluir que a utilização da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, determinadas por meio de ensaios de ultra-som, apresenta grande potencialidade

na inferência dos valores das densidades médias das chapas de fibra do tipo MDF, confeccionadas com fibras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*. A adoção do tipo de transdutor pode ser realizada em função da melhor adequação de aplicação do procedimento na linha de produção.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro.

À Empresa Duratex pelo auxílio na confecção das chapas e realização dos ensaios mecânicos destrutivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EMB - EUROMDFBOARD. MDF - medium density fiberboard definition - test methods and requirements. Industry standard: Part 1- generalities. Giessen: EMB/IS, 1995.

EMB - EUROMDFBOARD. MDF - medium density fiberboard definition - test methods and requirements. Industry standard: Part 2- requirements for general purpose boards. Giessen: EMB/IS, 1995.

KAZEMI NAJAFI, S; EBRAHIMI, G. Three methods for the prediction of longitudinal ultrasonic wave velocity in particle board and fiberboard. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 14., 2005, Eberswalde. **Proceedings**. Aachen: Shaker Verlag, 2005.

WANG, X.; SALENIKOVICH, A.; MOHAMMAD, M.; HU, L.J. Evaluation of density distribution in wood-based panels using X-Ray scanning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 14., 2005, Eberswalde. **Proceedings**. Aachen: Shaker Verlag, 2005.