UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARÍLIA DA SILVA BERTOLINI

**Painéis de resíduos madeiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana
à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas**

**São Carlos
2014**

MARÍLIA DA SILVA BERTOLINI

Versão Corrigida Original da Unidade

**Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana
à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

**São Carlos
2014**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B546p Bertolini, Marília da Silva
Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de
pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona
para aplicação como composições termoacústicas /
Marília da Silva Bertolini; orientador Francisco
Antonio Rocco Lahr. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Ciências e Engenharia de Materiais e Área de
Concentração em Desenvolvimento Caracterização e
Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Painéis de partículas. 2. Resíduos de madeira.
3. Borracha de pneu . 4. Espuma poliuretana à base de
mamona. 5. Isolamento térmico. 6. Absorção Sonora. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheira **MARILIA DA SILVA BERTOLINI**.

Título da tese: "Painéis de resíduos madeiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas".

Data da defesa: 04/09/2014.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Dra. **Stelamaris Rolla Bertoli**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Prof. Dr. **André Luis Christoforo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

André L. C.

Prof. Associado **Juliano Fiorelli**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

APROVADA

Profa. Dra. **Cristiane Inácio de Campos**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Itapeva)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Titular **Waldek Wladimir Bose Filho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Henrique e Dulcineia, e meus irmãos, Vanessa e Paulo,
Ao meu querido Deus,
Ao meu noivo César,
Dedico com todo amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo amor infinito e presença constante em minha vida. Sem Ele nada seria possível.

À minha família que com todo amor me educou e proporcionou meios para conseguir meus objetivos de vida.

Ao César pelo amor, dedicação e companheirismo em todas as horas.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr pela dedicada orientação, pelo exemplo de profissional e pessoa, com seus ensinamentos, incentivo e amizade.

À pesquisadora Maria Fátima (Fati), pela amizade e todo conhecimento repassado nestes anos de convivência.

Ao Ricardo, Plural Química LTDA., pela doação da resina e espumas poliuretanas.

À Prof. Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli, Universidade Estadual de Campinas, pelo apoio nas medições acústicas.

À aluna romena Iulia, pela ajuda nas medições acústicas.

Ao Prof. Dr. Wilson Nunes dos Santos, da Universidade Federal de São Carlos, pelo apoio nos ensaios de condutividade térmica.

Ao Prof. Dr. Antonio Aprigio da Silva Curvelo e ao técnico Luiz, do Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo, pela ajuda nos ensaios de caracterização química.

Ao Prof. Dr. André Luis Christoforo, da Universidade Federal de São Carlos, pela amizade, auxílio e conhecimentos em estatística.

Aos professores e funcionários em geral, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM). Em especial ao técnico Cido, pela ajuda na execução do trabalho e dedicação nestes anos de convivência e pesquisa.

Aos amigos de todos os anos de LaMEM: Márcio, Júlio, Pedro, Neto, Maria Gorett, Luciano, Raquel, Natália, Amós, Felipe, Diego, Diogo, Tiago, Sabrina, Leonardo, Marcos César, Lorena e Glória.

Às amigas e colegas de trabalho Fabiane e Laurenn, pelo companheirismo e momentos de descontração.

Às amigas Ingrid e Simone, pela amizade e anos de convivência em São Carlos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo 2011/21075-3), pela bolsa de doutorado concedida e apoio financeiro.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

BERTOLINI, M. S. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas.** 256f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Questões ligadas ao desempenho térmico e acústico de edificações têm sido cada vez mais abordadas, num cenário em que ganham importância a economia de energia e o controle do ruído. O advento dos materiais compósitos propiciou o emprego de resíduos de processos que, aliados a materiais de origem renovável, contribuem para a obtenção de produtos de reduzido impacto ambiental. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo a produção e caracterização de painéis de partículas e espuma poliuretana à base de óleo de mamona, para destinação em composições termoacústicas. Os painéis de partículas foram produzidos utilizando-se resíduos de madeira de *Pinus* sp., tratado com CCB (preservante de cromo, cobre e boro - base óxido), borracha de pneus inservíveis e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Foram adotadas variações na produção dos painéis, quanto aos fatores: proporção e configuração da borracha, espessura e pressão de prensagem; verificando sua influência no desempenho dos painéis. As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram determinadas conforme a ABNT NBR 14810-3 (2006) e avaliadas segundo os principais requisitos de normas neste âmbito. Análises estatísticas (ANOVA) foram realizadas para verificação da influência dos fatores de produção, e de suas interações, nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Também foram avaliadas a morfologia e estabilidade térmica dos painéis e espumas. O isolamento térmico foi avaliado pela determinação experimental da condutividade térmica. A absorção sonora dos painéis e espumas, em diferentes montagens, foi determinada por medições em câmara reverberante, conforme ISO 354 (1985). Os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis estiveram em grande parte condizentes com os documentos normativos. O teor de borracha e a sua interação com os demais fatores apresentaram influência estatística nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. A morfologia dos painéis e espumas permitiu visualizar sua adequação aos produtos propostos, por meio da porosidade. Em relação ao isolamento térmico e absorção sonora, os painéis e espumas, bem como as composições formadas, apresentaram desempenho coerente com produtos e normas utilizados como referência. Sendo assim, verificou-se a viabilidade de produção e aplicação dos painéis e espuma poliuretana à base de mamona em composições destinadas ao conforto termoacústico.

Palavras-chave: Painéis de partículas. Resíduos de madeira. Borracha de pneu. Espuma poliuretana à base de mamona. Isolamento térmico. Absorção Sonora.

ABSTRACT

BERTOLINI, M. S. **Panels from wood and tire rubber wastes associated with castor-oil-based polyurethane foam for application as thermo-acoustic compositions.** 256f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Issues relating to thermal and acoustic performance of buildings have been increasingly addressed in a scenario where energy savings and noise control are essential. Advent of composite materials enabled the use of residues from production processes that, coupled with renewable source materials, contribute to obtain products with low environmental impact. So, this study aimed to the production and characterization of particleboards and castor-oil-based polyurethane foam, for thermo-acoustic compositions. Panels were produced with residues of *Pinus* sp., treated with CCB (chromium, copper and boron basic oxide preservative), tire rubber wastes and castor-oil-based polyurethane adhesive. Variations in the production parameters were adopted: proportion and configuration of tire rubber; panel's thickness; and pressing pressure, to determine their influence on panel performance. Physical and mechanical properties of particleboards were determined based on ABNT NBR 14810-3 (2006) and evaluated according to the main requirements of standards in this area. Statistical analysis (ANOVA) was performed to check the influence of production factors, and their interactions, in those properties. Morphology and thermal stability of foams and panels were also evaluated. Thermal insulation was evaluated by experimental values of thermal conductivity. Sound absorption of the panels and foams, in different assemblies, was determined by measurement in a reverberation room, according to ISO 354 (1985). Results of evaluated panel properties were consistent with the normative requirements. The tire rubber content and its interaction with other factors influenced in almost all physical and mechanical properties of the particleboards. Morphology of the foams and panels permitted confirming their suitability to the proposed product by the porosity. With respect to thermal insulation and sound absorption, panels and foams as well as the correspondent compositions showed performance consistent to the references. Therefore, it was demonstrated the production feasibility and applying of studied compositions intended for the thermo-acoustic comfort.

Keywords: Particleboard. Wood wastes. Tire rubber. Castor-oil-based polyurethane foam. Thermal insulation. Sound absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da estrutura dos pneus. Fonte: Fundação Israel Pinheiro (2014).	40
Figura 2 – Relação entre densidade e condutividade térmica de alguns materiais. Fonte: Westphal, Marinowski e Lamberts (2001).	47
Figura 3 - Materiais isolantes térmicos convencionais. Adaptado de: Westphal, Marinowski e Lamberts (2001).	48
Figura 4 – Dissipação do som através de uma parede de blocos de concreto coberta por material absorvente. Fonte: Everest (2001).	51
Figura 5 – Efeito das variáveis de uma amostra de fibra de vidro na capacidade de absorção do som. Fonte: Everest (2001).	55
Figura 6 – Exemplo de painel vibrante. Fonte: Santos, J. L. P. (2005).	56
Figura 7 – Princípio do sistema dos ressonadores. Fonte: Santos, J. L. P. (2005).	57
Figura 8 – Câmara reverberante. Fonte: Patrício e Patraquim (2008).	59
Figura 9 – Representação do tubo de impedância. Fonte: Everest (2001).	60
Figura 10 – Esquema do tubo de impedância para determinação da perda de transmissão do som. Fonte: BRÜEL & KJÆR (2012).	61
Figura 11– Materiais - produção dos painéis: (a) <i>Pinus</i> sp. tratado com CCB processado em desgrossadeira; (b) partículas de madeira; (c) grânulos de borracha de pneu; (d) adesivo PU bicomponente à base de mamona.	68
Figura 12 – Etapas de produção dos painéis de partículas.	72
Figura 13 – Painéis de Partículas: (a) amostras testemunhas (100% madeira); (b) amostras com adição de borracha misturada à madeira (MB) e; (c) amostras contendo madeira e borracha em camadas (C).....	73
Figura 14 – Procedimento utilizado para a expansão das espumas PU à base de mamona: (a) e (b) pesagem dos componentes da espuma; (c) misturador; (d) molde; (e) e (f) expansão da espuma e; (g) espuma poliuretana expandida.	74
Figura 15 – Espumas poliuretanas: a) espuma comercial; b) espuma poliuretana a base de óleo de mamona.	75
Figura 16 - Equipamento Solotest – Classificação das partículas de madeira e borracha.....	76
Figura 17 - Termobalança para determinação do teor de umidade das partículas.	77
Figura 18 – Esquema de corte dos painéis para obtenção dos corpos de prova (dimensões em mm). .	78
Figura 19 – Equipamento TGA-50 Schimadzu para análise termogravimétrica.....	80
Figura 20 – Corpos de prova no porta-amostra para análises por MEV.	82

Figura 21 – Da esquerda para a direita: amostras recobertas em ouro; introdução das amostras no detector do MEV e equipamentos para o ensaio de MEV.....	82
Figura 22 – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio: (a) amostras; (b) corpo de prova na cápsula de ensaio; (c) equipamento Micromeritics Poresizer 9320.	84
Figura 23 – Inchamento em espessura e absorção de água: imersão, medidas de espessura e pesagem dos corpos de prova.	86
Figura 24 – Ensaio de flexão estática: determinação do MOR e MOE.....	87
Figura 25 – Tração perpendicular às faces: a) corpo de prova; b) ensaio.	88
Figura 26 – Ensaio de arrancamento de parafuso: a) em relação ao topo; b) em relação à superfície..	89
Figura 27 – Esquema do arranjo dos corpos de prova no método da coluna fracionada modificada. Fonte: Santos, W. N. (2011).	93
Figura 28 – Corpos de prova para ensaio de condutividade térmica: a) espuma poliuretana derivada da mamona; b) espuma poliuretana comercial; c) painel com mistura de borracha; c) painel com borracha em camada.	94
Figura 29 – a) Equipamento para determinação da condutividade térmica; b), c) e d) posicionamento do corpo de prova na coluna - termopares entre padrão e amostra e fechamento da coluna com o padrão.	95
Figura 30 – Ensaio de Absorção Sonora: (a) câmara reverberante em escala 1:5 com difusores em destaque; (b) fonte sonora omnidirecional em escala 1:5; (c) microfone - captação dos sinais e; (d) equalizador.	98
Figura 31 – Comparativo de determinações da absorção sonora em câmara reverberante de escala real em relação à câmara reverberante em escala de 1:5. Fonte: Santos e Bertoli (2009).....	99
Figura 32 – Representação da superfície da câmara reverberante 1:5 preenchida pelas amostras e posicionamentos do microfone (M) e fonte sonora.	99
Figura 33 – Montagem das composições termoacústicas: a) etapas 1; b) etapa 2; c) etapas 3 e 4.....	102
Figura 34 – Montagem das composições termoacústicas: a) etapa 5; b) etapas 6 e 7.....	102
Figura 35 – Classificação de tamanhos de partículas de madeira.	109
Figura 36 – Classificação de tamanhos dos grânulos de borracha de pneu.....	110
Figura 37 – Curva termogravimétrica para a amostra de painel – região de madeira (Pmad).	113
Figura 38 – Curva termogravimétrica para a amostra de painel – região de borracha (Pbo).	113
Figura 39 – Curva termogravimétrica para a amostra de espuma PU derivada do óleo de mamona (Emam).	114
Figura 40 – Curva termogravimétrica para a amostra de espuma PU comercial (Ecom).	114
Figura 41 – Imagens de MEV com visão geral das amostras: (a) M(4) – região de painel madeira (4 MPa); (b) B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa); (c) M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa); (d) B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).	118

Figura 42 – Imagens de MEV representando vazios (em destaque) na microestrutura de amostras: (a) M(4) – região de painel madeira (4 MPa); (b) M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa); (c) B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa); (d) B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).	118
Figura 43 – Imagens de MEV representando a distribuição do adesivo (em destaque) nas amostras de painéis de madeira: (a) adesivo na superfície das partículas de madeira; (b) topo da partícula contendo o adesivo; (c) região de pontoações da microestrutura da madeira.	119
Figura 44 - Imagens de MEV representando a distribuição do adesivo (em destaque) nas amostras de painéis de regiões de borracha: adesivo ligado superficialmente nos grânulos de borracha.	119
Figura 45 – Imagens de MEV com visão geral das amostras: (a) C(4) região de separação das camadas madeira e borracha (4 MPa); (b) MB(4) – painel de mistura borracha (4MPa); (c) C(2,5) região de separação das camadas madeira e borracha 2,5 MPa; (d) MB(2,5) – painel de mistura borracha (2,5 MPa).....	120
Figura 46– Imagens de MEV para análise da adesão entre as fases: (a) representação da interface entre toda a partícula de madeira e grânulo de borracha e; (b) “destaque” da região de interface.....	121
Figura 47 – Imagens de MEV – visão geral da estrutura das espumas poliuretanas: (a) amostra COM; (b) amostra MAM.....	121
Figura 48 – Imagens de MEV – rupturas das células das espumas: (a) e (b) COM; (c) e (d) MAM.....	122
Figura 49 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras M(4) – região de painel madeira (4 MPa) e M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa).....	123
Figura 50 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa) e B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).	123
Figura 51 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras MB(4) – painel de mistura borracha (4MPa) e MB(2,5) – painel de mistura borracha (2,5MPa).....	124
Figura 52 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras C(4) região de separação das camadas madeira e borracha (4 MPa) e C(2,5) região de separação das camadas madeira e borracha (2,5 MPa).	124
Figura 53 - Gráfico de interação entre fatores para TU – 3º Planejamento Experimental: [Config×Press].....	136
Figura 54 – Gráficos de interação entre fatores para IE – 2 horas - 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).....	141
Figura 55 – Gráficos de interação entre fatores para IE – 24 horas – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).....	142
Figura 56 – Gráfico de interação entre fatores para IE – 2 horas – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].....	144

Figura 57 – Gráfico de interação entre fatores para IE – 24 horas – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].	144
Figura 58 - Gráficos de interação entre fatores para o IE-2h – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Config] (a), [%Bor×Press] (b) e [Config×Esp] (c).	147
Figura 59 - Gráficos de interação entre fatores para o IE-24h – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Press] (a) e [Config×Esp] (b).	147
Figura 60 - Gráfico de interação entre fatores para AA-2h – 3º Planejamento Experimental: [Config×Esp].	148
Figura 61 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR -1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press] (a) e [%Esp×Press] (b).	153
Figura 62 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE -1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press] (a) e [%Esp×Press] (b).	154
Figura 63 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp×Press].	156
Figura 64 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp×Press].	156
Figura 65 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [Config×Press] (b).	159
Figura 66 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE – 3º Planejamento Experimental: [Config×Press] (a) e [Esp×Press] (b).	159
Figura 67 – Rompimento dos corpos de prova na tração perpendicular às faces: a) painel contendo apenas madeira; b) painel com borracha em camada; c) painel com mistura de borracha.	162
Figura 68 – Gráficos de interação entre fatores para a RTP – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].	164
Figura 69 - Gráficos de interação entre fatores para a RTP referente ao segundo Planejamento Experimental: [%Bor×Press].	166
Figura 70 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].	172
Figura 71 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPtop – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp](a) e [Esp×Press](b).	172
Figura 72 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).	174
Figura 73 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).	177
Figura 74 – Comparativo de condutividade térmica: tratamentos de baixa e média densidade × valores da NBR 15220 (2003).	179

Figura 75 – Esquema da montagem das composições - determinação da transmitância térmica (dimensões em mm).	182
Figura 76 – Representação de parede simples com painel isolante térmico – transmitância térmica. Fonte: Ecoplace (2012).....	183
Figura 77 - Coeficiente de Absorção Sonora: comparativo entre painéis contendo 50 e 75% de borracha na configuração “mistura borracha - MB”	185
Figura 78 – Coeficiente de Absorção Sonora: comparativo entre painéis contendo 50 e 75% de borracha na configuração “camada”	185
Figura 79 - Coeficiente de Absorção Sonora: efeito da posição das camadas de madeira e borracha dos painéis em relação à base da câmara reverberante.	187
Figura 80 – Efeito da porosidade no desempenho fonoabsorvente: (a) partícula de madeira com vazios internos de sua microestrutura (em destaque); (b) superfície pouco permeável da borracha.	188
Figura 81 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 100% madeira “testemunhas”	189
Figura 82 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 50% de borracha na configuração camada.....	189
Figura 83 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 50% de borracha na configuração mistura borracha (MB).	190
Figura 84 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da configuração dos painéis contendo borracha - comparativo entre camada e mistura de borracha (MB).....	191
Figura 85 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da adição de borracha – comparativo entre amostras contendo madeira e amostras com adição de borracha (configuração mistura borracha - MB).	192
Figura 86 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras contendo madeira (Tr 2 e 4) e medições com camada de ar (Tr 2' e 4').....	193
Figura 87 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras configuradas em camadas de borracha (Tr 6 e 8) e medições com camada de ar (Tr 6' e 8').	194
Figura 88 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras configuradas em mistura borracha (Tr 10 e 12) e medições com camada de ar (Tr 10' e 12').	194
Figura 89 - Coeficiente de Absorção Sonora: desempenho das espumas poliuretanas – derivada de mamona e comercial.....	196
Figura 90 - Coeficiente de Absorção Sonora: amostras sem preenchimento da camada de ar (') com as espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras 100% madeira.	197

Figura 91 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito do preenchimento da camada de ar (') com as espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras configuradas em camadas.	198
Figura 92 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito do preenchimento da camada de ar (') com espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras configuradas em mistura borracha.	199
Figura 93 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [1º Planejamento Experimental].	224
Figura 94 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [1º Planejamento Experimental].	225
Figura 95 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [1º Planejamento Experimental].	226
Figura 96 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [1º Planejamento Experimental].	227
Figura 97 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [1º Planejamento Experimental].	228
Figura 98 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a ρ [1º Planejamento Experimental].	229
Figura 99 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [1º Planejamento Experimental].	230
Figura 100 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [1º Planejamento Experimental].	231
Figura 101 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [1º Planejamento Experimental].	232
Figura 102 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [1º Planejamento Experimental].	233
Figura 103 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [1º Planejamento Experimental].	234
Figura 104 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [2º Planejamento Experimental].	235
Figura 105 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [2º Planejamento Experimental].	236
Figura 106 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [2º Planejamento Experimental].	237
Figura 107 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [2º Planejamento Experimental].	238

Figura 108 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [2° Planejamento Experimental].	239
Figura 109 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o ρ [2° Planejamento Experimental].	240
Figura 110 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [2° Planejamento Experimental].	241
Figura 111 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [2° Planejamento Experimental].	242
Figura 112 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [2° Planejamento Experimental].	243
Figura 113 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [2° Planejamento Experimental].	244
Figura 114 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [2° Planejamento Experimental].	245
Figura 115 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [3° Planejamento Experimental].	246
Figura 116 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [3° Planejamento Experimental].	247
Figura 117 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [3° Planejamento Experimental].	248
Figura 118 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [3° Planejamento Experimental].	249
Figura 119 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [3° Planejamento Experimental].	250
Figura 120 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o ρ [3° Planejamento Experimental].	251
Figura 121 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [3° Planejamento Experimental].	252
Figura 122 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [3° Planejamento Experimental].	253
Figura 123 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [3° Planejamento Experimental].	254
Figura 124 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [3° Planejamento Experimental].	255
Figura 125 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [3° Planejamento Experimental].	256

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos preservantes CCA e CCB segundo ABNT NBR 8456 (1984). Fonte: Adaptado de Jankowsky; Barillari e Freitas (2002).	35
Tabela 2 – Composição dos pneus em diferentes tipos de veículos. Fonte: WRAP (2006).	39
Tabela 3 – Possibilidades de reutilização da borracha de pneu inservível. Fonte: Adaptado de Saiwari (2013).	43
Tabela 4 - Condutividade térmica de alguns materiais. Fonte: Moreschi (2010).....	46
Tabela 5 - Equivalência em termos de isolamento térmico. Fonte: Costa (2008).....	48
Tabela 6 – Coeficiente de absorção acústica (α) de alguns materiais. Adaptado ABNT NBR 12179 (1992).	53
Tabela 7 – Formulação da espuma poliuretana a base de óleo de mamona.	69
Tabela 8 - Parâmetros adotados nas etapas do estudo preliminar.	70
Tabela 9 – Tratamentos (Tr) obtidos pela combinação dos fatores na produção dos painéis.	71
Tabela 10 – Corpos de prova para os ensaios de caracterização.	78
Tabela 11 – Ensaios para caracterização das composições termoacústicas.	79
Tabela 12 – Amostras de painéis para ensaio de MEV.	81
Tabela 13 – Primeiro planejamento fatorial: painéis com mistura de borracha <i>versus</i> painéis contendo apenas madeira.	90
Tabela 14 - Segundo planejamento fatorial: painéis com borracha em camada <i>versus</i> painéis de madeira.	90
Tabela 15 - Terceiro planejamento fatorial: comparativo entre as duas configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	91
Tabela 16 – Planejamento de ensaio: determinação dos coeficientes de absorção sonora.....	101
Tabela 17 – Propriedades físicas dos painéis – Estudo preliminar.	105
Tabela 18 – Propriedades mecânicas dos painéis – Estudo preliminar.	106
Tabela 19 – Distribuição granulométrica das partículas de madeira e de borracha.	108
Tabela 20 – Valor médio do teor de umidade obtido para as partículas de <i>Pinus</i> sp. tratado com CCB.	111
Tabela 21 - Intervalos de temperatura e perda de massa das curvas TG.....	115
Tabela 22 – Características porosimétricas dos painéis de partículas – amostras contendo madeira (M) e amostras contendo borracha (B).	125
Tabela 23 - Características porosimétricas dos painéis de partículas – amostras contendo os insumos nas configurações camada (C) e mistura borracha (MB).	125

Tabela 24 – Valores médios da densidade aparente: espuma PU de mamona e espuma PU comercial.	127
Tabela 25 - Valores médios do teor de umidade e densidade - painéis 100% madeira.....	128
Tabela 26 - Valores médios do teor de umidade e densidade - painéis 100% madeira/50% borracha. ..	129
Tabela 27 - Valores médios do teor de umidade e densidade – painéis 100% madeira/75% borracha.	129
Tabela 28 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	131
Tabela 29 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	132
Tabela 30 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	133
Tabela 31 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	133
Tabela 32 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental– comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	134
Tabela 33 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	135
Tabela 34 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira.....	137
Tabela 35 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira/50% borracha.....	137
Tabela 36 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira/75% borracha.....	138
Tabela 37 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	140
Tabela 38 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	140
Tabela 39 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	143

Tabela 40 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	143
Tabela 41 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	145
Tabela 42 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	146
Tabela 43 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira.....	149
Tabela 44 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira/50% borracha.	149
Tabela 45 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira/75% borracha.	150
Tabela 46 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.....	152
Tabela 47 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	153
Tabela 48 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	155
Tabela 49 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	155
Tabela 50 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	157
Tabela 51 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.	158
Tabela 52 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira.	160
Tabela 53 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira/50% ..	160
Tabela 54 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira/75% borracha.....	161
Tabela 55 – Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	163
Tabela 56 – Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	164
Tabela 57 - Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.....	165
Tabela 58 - Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	165

Tabela 59 - Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.....	167
Tabela 60 - Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura....	167
Tabela 61 - Valores médios de RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira.....	168
Tabela 62 - Valores médios de RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira/50% borracha.	169
Tabela 63 - Valores médios RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira/75% borracha.	169
Tabela 64 - Resultados da ANOVA para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental - painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.....	171
Tabela 65 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental - painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.	171
Tabela 66 - Resultados da ANOVA para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	173
Tabela 67 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.	174
Tabela 68 - Resultados da ANOVA para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura. ..	175
Tabela 69 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.....	176
Tabela 70 - Valores médios da condutividade térmica (k) - painéis de partículas e espumas poliuretanas. .	178
Tabela 71 – Condutividade térmica (k) de painéis/compósitos de partículas.	179
Tabela 72 – Condutividade térmica (k) de materiais utilizados na construção civil como enchimento de paredes/coberturas.	180
Tabela 73 - Resistência térmica (R) - painéis e espumas poliuretanas.....	181
Tabela 74 – Valores de R_t , R_T e U para as composições termoacústicas em parede.	183
Tabela 75 – Determinação dos coeficientes de absorção do esquadro.....	186
Tabela 76 – Comparativo de composições termoacústicas com materiais para absorção sonora – painéis na base da câmara.....	201
Tabela 77 - Comparativo das composições termoacústicas com materiais para absorção sonora – painéis com camada de ar preenchida por material absorvente.....	202
Tabela 78 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 1º Planejamento Experimental (painéis com mistura de borracha <i>versus</i> painéis contendo somente madeira).	223

Tabela 79 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 2º Planejamento Experimental (painéis com borracha em camada × painéis contendo somente madeira).....	223
Tabela 80 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 3º Planejamento Experimental (painéis com mistura de borracha × painéis com borracha em camada).....	224

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPM	Associação Brasileira de Preservadores de Madeira
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ANOVA	Análise de Variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APRE	Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BR	<i>Butadiene rubber</i> - Polibutadieno
CCA	Composto à base de Cromo, Cobre e Arsênio
CCB	Composto à base de Cromo, Cobre e Boro
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CS	<i>Commercial Standard</i>
DTG	Termogravimetria Derivada
EM	<i>European Standards</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
HCFC	Hidroclorofluorcarbonos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MDI	<i>Methylene Diphenyl di-Isocyanate</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MLC	Madeira Laminada Colada
MOR	Módulo de Ruptura
MOE	Módulo de Elasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NR	<i>Natural rubber</i> – Borracha natural
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PU	Poliuretano
SBR	<i>Styrene butadiene rubber</i> - Copolímero estireno-butadieno
SINDUSCONSP	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo
TG	Termogravimetria
WRAP	<i>The Waste & Resources Action Programme</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{x}$	média
Tr	tratamento
α	Nível de significância
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
CV	Coeficiente de variação
q	Fluxo de calor
k ou λ	Condutividade térmica
R	Resistência térmica
U	Transmitância térmica
Fr	Frequência
T	Tempo de Reverberação
α_s	Coeficiente de absorção sonora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos.....	27
1.1.1	Objetivos Gerais	27
1.1.2	Objetivos Específicos	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Painéis de Madeira Aglomerada	29
2.2	Madeira tratada.....	34
2.2.1	Aproveitamento de rejeitos de madeira tratada	36
2.3	Borracha de Pneu	39
2.3.1	Características dos pneus	39
2.3.2	Cenário do emprego de pneus no Brasil	41
2.3.3	Reciclagem da Borracha de Pneu Inservível	41
2.4	Espumas poliuretanas	43
2.4.1	Espumas Poliuretanas à base de óleo de mamona	45
2.5	Propriedades Térmicas dos Materiais	46
2.5.1	Métodos de determinação das propriedades térmicas dos materiais.....	49
2.6	Absorção Sonora.....	50
2.6.1	Mecanismos de absorção sonora.....	55
2.6.2	Métodos para determinação da absorção sonora.....	58
2.7	Pesquisas no âmbito de painéis e compósitos com propriedades térmicas e acústicas.....	61
2.8	Considerações sobre a Revisão Bibliográfica.....	66
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1	Materiais.....	67
3.2	Estudos preliminares.....	69
3.3	Produção dos Painéis de Partículas	70
3.4	Produção das Espumas Poliuretanas	73
3.5	Caracterização das partículas de madeira e de borracha.....	75
3.5.1	Análise granulométrica	75
3.5.2	Teor de umidade	76
3.6	Caracterização dos painéis de partículas e espumas poliuretanas.....	77
3.6.1	Obtenção dos corpos de prova e descrição dos ensaios	77
3.6.2	Estabilidade térmica - Análise Termogravimétrica	80
3.6.3	Caracterização morfológica	81

3.6.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis e espumas.....	81
3.6.3.2	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio - painéis.....	83
3.6.4	Densidade aparente – espumas poliuretanas.....	84
3.6.5	Propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas.....	84
3.6.5.1	Teor de umidade e Densidade.....	85
3.6.5.2	Inchamento em espessura e Absorção de água.....	85
3.6.5.3	Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).....	86
3.6.5.4	Tração Perpendicular às faces.....	88
3.6.5.5	Arrancamento de parafuso – topo e superfície.....	89
3.6.5.6	Análise estatística.....	89
3.6.6	Determinação das propriedades para o isolamento térmico.....	92
3.6.6.1	Ensaio de Condutividade Térmica.....	92
3.6.6.2	Resistência térmica, resistência térmica total e transmitância térmica.....	96
3.6.7	Determinação da propriedade acústica de absorção sonora.....	97
3.6.7.1	Medições preliminares.....	100
3.6.7.2	Medições principais.....	100
3.6.7.3	Análise dos resultados – Absorção Sonora.....	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	105
4.1	Estudo preliminar.....	105
4.2	Caracterização das partículas de madeira e de borracha.....	108
4.2.1	Análise granulométrica.....	108
4.2.2	Teor de umidade das partículas.....	111
4.3	Caracterização dos painéis de partículas e espumas poliuretanas.....	112
4.3.1	Estabilidade térmica - Análise termogravimétrica.....	112
4.3.2	Caracterização morfológica.....	117
4.3.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	117
4.3.2.2	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – painéis de partículas.....	123
4.3.3	Densidade aparente – espumas poliuretanas.....	126
4.3.4	Propriedades físicas e mecânicas - painéis de partículas.....	127
4.3.4.1	Teor de umidade e Densidade.....	128
4.3.4.2	Inchamento em espessura e absorção de água.....	136
4.3.4.3	Módulo de ruptura e módulo de elasticidade.....	148
4.3.4.4	Resistência à tração perpendicular às faces.....	160
4.3.4.5	Resistência ao arrancamento de parafuso – topo e superfície.....	168
4.3.5	Determinação das propriedades para o isolamento térmico.....	177
4.3.5.1	Condutividade térmica e resistência térmica.....	177

4.3.5.2	Resistência térmica total e transmitância térmica	182
4.3.6	Determinação da propriedade de absorção sonora.....	184
4.3.6.1	Medições Preliminares	184
4.3.6.2	Medições Principais	187
4.3.6.3	Comparativo de α_s das composições termoacústicas com produtos de referência....	200
5	CONCLUSÕES.....	203
	REFERÊNCIAS	207
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA	223

1 Introdução

Atualmente, questões ligadas ao desempenho térmico e acústico tornam-se primordiais, no que diz respeito, à economia de energia devido à redução das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do interior das edificações, e à adoção de medidas de controle do ruído, provocado pelo desenvolvimento da atividade humana contemporânea.

Zhao et al. (2010) enfatizam que o ruído caracteriza-se como um dos principais fatores que prejudicam a saúde humana. Deste modo, torna-se imprescindível a adoção de medidas de remediação, criando-se materiais com melhores propriedades acústicas, diminuindo as ondas sonoras ou eliminando-as na forma de transmissão.

O isolamento térmico é utilizado em edifícios para reduzir o fluxo de calor através das superfícies exteriores das construções, tornando mais frescas no verão e mais quentes no inverno (GELLERT, 2010). O projeto de edifícios e espaços urbanos que atendam aos requisitos de conforto térmico está condicionado, além das particularidades do clima e das exigências humanas, às características térmicas dos materiais empregados (FROTA e SCHIFFER, 2001). A determinação da condutividade térmica permite a comparação quantitativa da eficácia de diferentes materiais de isolamento térmico, verificando-se sua capacidade de condução de calor (AL-HOMOUD, 2005).

A madeira se destaca pelo potencial de emprego na construção civil, em função de suas interessantes propriedades, em especial por sua estrutura porosa caracterizando-a como bom isolante de temperatura. Ressaltam-se também suas propriedades acústicas, por meio da aplicação em instrumentos musicais. Em paredes a madeira pode ser utilizada alcançando melhor desempenho acústico em estruturas compostas, incorporando-se entre estas alguns materiais absorventes de som, moles e porosos, como lã de vidro, poliestireno expandido (EPS) ou poliuretanos (MORESCHI, 2010).

Assim como a madeira, seus produtos derivados apresentam elevada capacidade de isolamento térmico e de absorção sonora, devido à presença de espaços vazios em seu interior. Os painéis de madeira aglomerada, nomeados MDP (*Medium Density Particleboard*) representam uma produção mundial expressiva, atingindo em 2011 cerca de 94,6 milhões de m³, segundo a Food and Agriculture Organization - FAO (2012). Considerando-se este cenário, são motivadas pesquisas para aplicação de insumos em painéis provenientes não só de madeira de reflorestamento, mas a incorporação de rejeitos deste segmento. Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos abordando a aplicação de resíduos madeireiros, além da

utilização de materiais lignocelulósicos e poliméricos em painéis, como: Rauber (2011); Bertolini et al. (2013); Varanda et al. (2013); Nascimento et al., (2013); Fiorelli et al. (2014); Macedo (2014); entre outros.

O desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental, principalmente na questão de reutilização de resíduos, aliado a processos produtivos que reduzem custos e agregam valor aos produtos obtidos, definem a base do desenvolvimento sustentável. O emprego destes rejeitos de processos/produtos valoriza estes insumos, diminuindo a extração e o consumo de outros recursos, além de proporcionar descarte adequado. Além disso, o uso de materiais de origem renovável contribui em igual valor para este conceito.

Em todo o processo de transformação da madeira são gerados rejeitos, da colheita à manufatura, sendo mais significativas as perdas nas atividades da indústria de desdobro, laminação das toras e beneficiamento da madeira serrada (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010). Outra indústria geradora de resíduos no segmento da madeira é a da preservação contra a demanda biológica. Seus rejeitos são decorrentes de peças não aprovadas em controle de qualidade e do pós-consumo de produtos de madeira tratada, sendo classificados como altamente tóxicos (classe D), pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 307 e por esta aconselhada sua incineração. Entretanto, estima-se que metade das usinas de preservação no Brasil não opere de forma legal, havendo carência na fiscalização da incineração destes resíduos (Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo - SINDUSCONSP, 2010).

A expansão da indústria automobilística, desde o início do século XX, gerou segmentos para seu suprimento, sobressaindo-se a indústria de pneus (MARTINS, 2005). Fioriti e Akasaki (2004) definem os resíduos provenientes de borracha de pneus como intratáveis, devido à decomposição lenta e vida média de 240 anos. Estudos sobre aplicações que exploram as características deste material, como os de Nehdi e Khan (2001), Siddique e Naik (2004), Fioriti e Akasaki (2004), voltados aos compósitos cimentícios e recobrimentos asfálticos, abordaram características de baixa densidade para produtos desta natureza, capacidade de deformação e comportamento menos frágil que o concreto. Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com estes resíduos buscando-se produtos com propriedades acústicas, como trabalhos de Lindt et al. (2008) e Zhao et al. (2010).

Os materiais poliuretanos à base de óleo de mamona, propostos em pesquisas de desenvolvimento na década de 1940, voltaram a ser explorados para diversas aplicações, devido à atual preocupação em buscar insumos que reúnam características biodegradáveis e de reutilização (NARINE, et al. 2007; ARANGUREN; RÁCZ e MARCOVICH, 2007; CARDOSO, 2010;

MUTLU e MEIER, 2010). Saint-Michel; Chazeau e Cavaillé (2006) explicam que, em geral, espumas PU apresentam estrutura com elevada capacidade de absorção de energia além de baixa condutividade térmica. Estudos de Mosiewicki et al. (2009) demonstraram que espumas PU à base de mamona comparadas às de origem sintética apresentaram maior isolamento térmico.

Neste contexto se insere a realização do trabalho, cujo objetivo foi a produção e a caracterização de composições termoacústicas, formadas por painéis de partículas produzidos com resíduos de madeira de *Pinus* sp. tratado com CCB (preservante de cromo, cobre e boro na base óxido), resíduos de borracha de pneus inservíveis e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, incorporando-se entre painéis a espuma de poliuretano à base de óleo de mamona.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade do uso de insumos alternativos, correspondendo a resíduos de madeira de *Pinus* sp. tratada com CCB, borracha de pneu inservível, adesivo e espuma poliuretanos à base de óleo de mamona, na produção de composições termoacústicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) Produção e caracterização de painéis de partículas obtidos com emprego de resíduos de madeira de *Pinus* sp. tratado com CCB (preservante de cromo, cobre e boro na base óxido), resíduos de borracha de pneus inservíveis e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona;
- b) Produção e caracterização da espuma poliuretana à base de óleo de mamona e da espuma poliuretana comercial (a título de comparação);
- c) Definição de configurações/composições de painéis, em relação às variáveis adotadas em sua manufatura, buscando obter produtos em conformidade com as principais normas no âmbito dos painéis particulados;
- d) Obtenção de materiais com características morfológicas e de estabilidade térmica em conformidade com a aplicação proposta;
- e) Determinação de sistemas de montagem dos painéis e espumas, estabelecendo as melhores composições em termos de propriedades térmicas e de absorção sonora.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, a revisão da literatura abrange os tópicos: painéis derivados da madeira, em especial os particulados; madeira tratada e emprego destes rejeitos na produção de painéis; pneu e os resíduos de borracha de pneu inservível; espumas poliuretanas (tipos, produção, aplicações e pesquisas na área). A revisão também faz alusão às propriedades térmicas e acústicas (absorção sonora), citando pesquisas que abrangeram produtos comparáveis ao proposto neste trabalho.

2.1 Painéis de Madeira Aglomerada

Os “aglomerados” são conceituados por Iwakiri (2005), Moslemi (1974) e Maloney (1977) como painéis produzidos com partículas de madeira, incorporando-se resinas sintéticas ou outros adesivos, consolidados por meio de um processo de prensagem aplicando-se temperatura e pressão. Devido à modernização tecnológica no processo de prensagem cíclica para prensagem contínua, o que conferiu ao produto melhores características de resistência, em meados da década de 1990 foi implementada a nomenclatura MDP (*Medium Density Particleboard*), numa tentativa de dissociar o novo produto do aglomerado tradicional (MATTOS e GONÇALVES, 2008).

Dentre os painéis à base de madeira, que apresentaram produção mundial de 287,7 milhões de m³ em 2011, os painéis MDP representaram uma fatia expressiva, de aproximadamente 94,6 milhões de m³, conforme a Food and Agriculture Organization - FAO (2012). No Brasil, a produção destes painéis alcançou 3 milhões de m³ em 2011, com capacidade nominal instalada de 4,8 milhões de m³, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira - ABIPA (2013). Este cenário pode ser associado a facilidades na aplicação para mais variados fins, instalações de novas unidades produtoras, busca de novas tecnologias, além da disponibilidade de matéria-prima, sendo neste último caso relacionado não só aos recursos de origem reflorestada, mas a possibilidade do emprego de resíduos do beneficiamento primário da madeira (BERTOLINI et al. 2013).

Buscando um comparativo com a madeira maciça e seus outros derivados, os painéis MDP apresentam vantagens como: eliminação de efeitos da anisotropia; resistência da chapa no sentido da largura e do comprimento é similar; eliminação de fatores redutores da resistência como nós, inclinação da grã, lenhos juvenil e adulto, entre outros; controle das propriedades

físico-mecânicas por meio das variáveis de processo, como resina, geometria de partículas, grau de densificação, etc.; menor exigência em termos de qualidade da matéria-prima e menor custo de produção e mão de obra (BODIG E JAYNE, 1982; TOMASELLI, 2000; NASCIMENTO, 2003; IWAKIRI, 2005; DIAS, 2008; BERTOLINI et al. 2014).

A produção destes painéis consiste nas etapas descritas por Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975) a seguir:

- *Descascamento das toras*

Nesta etapa é retirada a casca, responsável por aproximadamente de 10% a 17% do volume da madeira, no caso dos *Pinus*. Os equipamentos empregados nesta operação podem ser móveis ou estacionários, com capacidades e volume específicos e com métodos de operações diferentes como: tambor rotativo de fricção; jateadores de água a alta pressão; correias; anel e cabeça atritante.

- *Produção das partículas*

A madeira pode passar por uma redução primária, para transformação das toras em cavacos, utilizando picadores e redução secundária, para obtenção das partículas, empregando-se moinhos. O tamanho das partículas é definido de acordo com a configuração desejada dos painéis.

- *Secagem das partículas*

A qualidade dos painéis produzidos depende diretamente do teor de umidade das partículas. As partículas entram no secador com umidade na faixa de 35% a 120% (base peso seco) alcançando teores de 3% a 6%, variando para teores de 5% a 12%. Este teor depende do tipo de resina empregada e será influente, sobretudo, no tempo de prensagem dos painéis, além ser dependente da espécie empregada e espessura das partículas. O equipamento mais comum para este tipo de operação industrial é o secador de tambor rotativo, no qual as partículas são secas sob temperatura e corrente de ar.

- *Classificação das partículas*

Nas indústrias, as partículas geralmente são separadas por equipamentos pneumáticos (os quais as classificam em função do peso) ou por classificador de telas, em que a seleção é realizada por meio da área superficial das partículas, dependendo da sua largura.

- Mistura das partículas e adesivo

A aplicação do adesivo nas partículas é realizada em grande parte por pulverização do adesivo, buscando-se uma uniformidade na aplicação. Desta forma, a viscosidade do adesivo torna-se um parâmetro importante. Nos painéis de partículas heterogêneas, ou de múltiplas camadas, os adesivos são aplicados separadamente nas partículas de diferentes dimensões.

- Formação do Colchão ou distribuição das partículas

A formação do colchão é realizada sobre esteiras contínuas com larguras definidas, de acordo com a densidade da chapa requerida e a espessura do painel, influenciadas diretamente pela densidade da espécie madeireira empregada. A caixa formadora possui “saídas”, conforme a configuração do painel, para deposição das partículas de diferentes tamanhos.

- Prensagem dos painéis

O colchão localizado em cima das esteiras transportadoras segue até a prensa, ocorrendo a consolidação por meio da aplicação de pressão e temperatura, em um determinado tempo, de forma a promover as reações de cura da resina. Anteriormente a prensagem, ocorre uma espécie de pré-prensagem, onde há uma previa compactação do colchão com pressões bem inferiores às empregadas na prensagem a quente.

- Acondicionamento e Operações de acabamento

Os painéis são seccionados e lixados para posterior acondicionamento, permitindo a estabilização da temperatura e umidade. Em seguida, são acertadas suas dimensões finais de acordo com as especificações do produto. Em geral, os painéis são comercializados pelas indústrias *in natura*, ou com revestimento superficial.

Diversos parâmetros definem a qualidade dos painéis de madeira aglomerada. Dentre eles podem ser citados a qualidade da madeira empregada, em relação às suas características, como densidade, espécie, acidez, extrativos, além dos demais insumos utilizados (adesivos e aditivos). Outros parâmetros referem-se às características do processo, como geometria, tamanho, distribuição das partículas e umidade das mesmas (MOSLEMI, 1974; KOLLMANN, KUENZI e STAMM, 1975; MALONEY, 1977; HILLIG, 2000; NASCIMENTO, 2003 e TRIANOSKI, 2010).

Nas indústrias, estes painéis são produzidos em configurações de camadas. Na camada central são empregadas partículas de maiores dimensões e, nas superfícies, partículas menores visando melhorar o acabamento superficial. Entretanto, tecnologias como abordado por Nascimento et al. (2013) de “painéis de partículas homogêneas” têm sido promissoras, tratando-se de um processo que dispensa a classificação de partículas, com reduzida quantidade de finos, e por meio de testes comprovada a sua boa aceitação em termos de acabamentos e impregnação de revestimentos.

Uma questão que se destaca atualmente na produção destes painéis refere-se aos adesivos empregados em sua composição.

Os adesivos à base de formaldeído, como a ureia-formaldeído, aplicados geralmente nas industriais de painéis aglomerados, são classificados como agentes de insalubridade máxima, devido à emissão do formol, substância considerada carcinogênica. Estas resinas caracterizam-se como o principal recurso responsável pelos maiores impactos ambientais no ciclo de vida do painel MDP (SILVA, 2012). Outras consequências estão associadas a estas resinas sintéticas e de fontes não renováveis como a oscilação na disponibilidade e custo dependente das matérias-primas que o compõem, assim como a possibilidade de reciclagem limitada do produto final, surgindo a necessidade da busca de alternativas a estes adesivos (GONZÁLEZ-GARCIA et al. 2011).

O desenvolvimento dos poliuretanos derivados de óleo de mamona teve origem na década de 1940, conforme aponta Mutlu e Meier (2010). O Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, desenvolveu o primeiro adesivo bicomponente derivado do óleo de mamona. O óleo de mamona é extraído da semente da planta *Ricinus Communis*, encontrada em regiões tropicais e subtropicais, sendo muito abundante no Brasil. É um líquido viscoso (poliol), obtido pela compressão das sementes ou por extração com solvente. A síntese do poliol e do pré-polímero, alcançada a partir do óleo de mamona, dá origem ao poliuretano. A reação de polimerização destes componentes ocorre por meio de sua mistura, podendo-se variar a porcentagem dos mesmos, definindo durezas diferentes, podendo também ser empregados catalisadores de forma a aumentar a velocidade de polimerização (DIAS, 2008).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com a utilização desta resina, principalmente no âmbito dos derivados de madeira, com excelentes resultados.

Jesus (2000) avaliou a eficiência da resina poliuretana à base de mamona, bicomponente, composta por poliol B1640 e pré-polímero A249, de cura a frio, na aplicação em madeira laminada colada (MLC), por meio de ensaios mecânicos de resistência ao

cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras, determinado os melhores parâmetros de colagem como tempo de cura, pressão da colagem e viscosidade. O autor obteve resultados atestando a viabilidade do emprego da resina para estes produtos derivados.

Estudos foram realizados por Campos (2005) sobre a produção e caracterização de painéis de MDF (*Medium Density Fiberboard*), empregando fibras de *Pinus* e *Eucalyptus* e três resinas diferentes: ureia-formaldeído, resina poliuretana bicomponente à base de mamona e uma resina inorgânica, nas proporções 8, 10 e 12%. Os painéis foram caracterizados quanto às suas propriedades físico-mecânicas, segundo as normas europeias EN, resultando em melhores propriedades para os painéis produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, em teores de 10 e 12%.

Dias (2005) abordou o desempenho de painéis compensados e aglomerados, produzidos com resina poliuretana à base de mamona e utilizando as espécies *Eucalyptus saligna*, para o compensado, e uma composição de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophilla* e *Pinus elliottii*, com variações nas temperaturas de prensagem (60 e 90°C) e adição de parafina, para os aglomerados. A avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis foi realizada segundo as normas específicas da ABNT e, no compensado, propriedades como resistência da colagem e esforço ao cisalhamento, segundo a norma EN. O desempenho de ambos os painéis atingiu os requisitos normativos em questão, caracterizando a resina à base de mamona como promissora na aplicação destes produtos.

Varanda et al. (2013) analisaram a viabilidade de produção de painéis de partículas com emprego de resíduos de casca de aveia, madeira de *Eucalyptus grandis* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. Os painéis alcançaram propriedades acima dos requisitos normativos para este produto, destacando-se os produzidos com 100% de casca de aveia e 10% de resina PU de mamona, bem como aqueles produzidos com 85% de madeira e 15% de casca de aveia, em relação ao módulo de ruptura na flexão estática.

Santos et al. (2014) produziram painéis de partículas de resíduos de madeira Tauari (*Couratari oblongifolia*), essência da região amazônica usada na fabricação de móveis, utilizando 16% (base peso madeira) de resina poliuretana à base de óleo de mamona. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 1000 kg/m³, diferenciando-se em relação às temperaturas de prensagem (90°C, 110°C e 130°C). Resultados mais satisfatórios foram obtidos para painéis prensados à temperatura mais elevada.

Macedo (2014) estudou a inclusão de 20 e 30% de partículas de polipropileno bi orientado, proveniente de embalagens alimentícias, na produção de painéis OSB (*Oriented*

Strand Board) de madeira de *Pinus* sp. e resina poliuretana à base de óleo de mamona, avaliando suas propriedades por meio da norma EN 300 (2006). Os painéis apresentaram-se em conformidade com requisitos de OSB 4 (aplicação em condições úmidas) para as propriedades físicas e OSB 1 (uso interior, condição seca) para as propriedades mecânicas de módulo de ruptura e de elasticidade na flexão.

2.2 Madeira tratada

O aumento da disponibilidade da madeira, principalmente de espécies já consolidadas no Brasil, como as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, deu-se principalmente devido à utilização de novas tecnologias silviculturais e crescentes investimentos em pesquisas e melhoramento genético (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, 2013).

Devido à maior susceptibilidade à degradação pela demanda biológica destas essências oriundas de florestas plantadas, quando comparadas a algumas espécies tropicais (madeiras densas e de coloração escura), o tratamento com substâncias preservantes torna-se necessário, permitindo maior vida útil em serviço (CASSENS et al., 1995; RICHARDSON, 1993). Hedley, Page e Patterson (2000) destacam em seus estudos que a durabilidade do *Pinus silvestris* tratado com arseniato de cobre cromatado (CCA) pode apresentar durabilidade maior que 15 anos. Estudo recente realizado no Brasil com madeiras do gênero *Pinus* indica que, quando tratadas com CCA, apresentam expectativa de vida média de 30 anos, o que significa a conservação de milhares de árvores por ano (BARILLARI, 2002).

O CCA é um preservante de madeiras de classe hidrossolúvel e inorgânico, impregnado sob pressão em autoclaves, apresentando elevada eficácia. No Brasil, o setor de preservação de madeiras é regulamentado pelo IBAMA e pela ANVISA, que classificam o CCA como extremamente tóxico (Classe I) IBAMA (2007), apontando restrições ao uso da madeira tratada com CCA e sua consequente substituição. Em países como Japão, Indonésia, Suécia, Dinamarca, Suíça, Alemanha e Estados Unidos, regulamentações têm restringido drasticamente o uso de CCA.

A Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal - APRE (2011) menciona que, segundo estimativas da Associação Brasileira de Preservadores de Madeira (ABPM), existem atualmente cerca de 250 usinas de preservação no Brasil produzindo 1,2 milhões de m³ de madeira tratada por ano.

O mercado de madeira tratada no Brasil movimenta cerca de R\$ 60 milhões por ano, gerando de 8 a 10 mil empregos diretos e quase 35 mil indiretos. Segundo a ABPM, parte considerável da madeira tratada, em torno de 65%, é consumida pela área rural, principalmente para a produção de cercas. O setor elétrico para confecção de postes recebe em torno de 15%, mesma quantidade em percentual destinado ao segmento ferroviário. A construção civil absorve entre 5% e 10% do total da madeira tratada produzida nacionalmente (ROSA, 2012). São utilizados para este fim principalmente *Pinus* e *Eucalyptus*, gêneros de maior destaque em mercado consumidor e reflorestamentos (PINHEIRO, 2001).

O CCB (composto a base de cromo, cobre e boro) surgiu como alternativa ao CCA, iniciando-se sua comercialização na Alemanha nos anos 1960 (MORESCHI, s.d). Este composto apresenta menor toxicidade devido à presença de boro substituindo o arsênio em sua composição (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição dos preservantes CCA e CCB segundo ABNT NBR 8456 (1984). Fonte:

Adaptado de Jankowsky; Barillari e Freitas (2002).

Produto	Proporção dos ingredientes ativos (%)			
CCA tipo A	66,5 CrO ₃	18,1 CuO	16,4 As ₂ O ₅	
CCA tipo B	35,3 CrO ₃	19,6 CuO	45,1 As ₂ O ₅	
CCA tipo C	45,5 CrO ₃	18,5 CuO	34,0 As ₂ O ₅	
CCB	63,5 CrO ₃	26,0 CuO	10,5 B	

No CCB, o boro caracteriza-se pela considerável capacidade de proteção contra fungos apodrecedores e insetos xilófagos, e pela boa relação custo-benefício (VALCÁRCEL et al., 2004). Além de possuir menor toxicidade, o ácido bórico migra mais profundamente na madeira após o tratamento. O cromo oferece o benefício de redução da corrosão de possíveis ligações por elementos na madeira (LEBOW, 2006). Atualmente produzido com formulação na base óxido, não interfere na condutibilidade elétrica na madeira e não provoca corrosão em contato com conectores metálicos (aços carbono e alumínio) (LEPAGE, 2010).

Apesar de o ácido bórico presente no CCB ser considerado lixiviável, tornando a madeira mais vulnerável ao ataque de fungos tolerantes ao cobre (LEBOW, 2006), Kakaras et al. (2002) relatam que a resistência a lixiviação do CCB frente ao CCA é relativa: depende das condições do meio de exposição, da espécie tratada e da retenção do preservante, existindo relatos de equivalente eficiência do CCB em relação ao CCA em condições de clima temperado, com

longos períodos de seca. Em relação à resistência a lixiviação do cobre, o CCB apresenta-se em vantagem em relação aos preservantes de soluções aquosas de cobre-etanolamina (CA-B) e soluções de quaternários de amônio (ACQ), conforme estudos de Humar e Pohleven (2006).

Pouco se conhece a respeito das propriedades da madeira tratada, porém, em estudos recentes, abordando a influência da preservação com CCB na madeira de *Pinus* sp., Rocco Lahr; Fernandes e Bertolini (2010), constataram que o tratamento preservante aumentou a massa específica desta espécie em até 27% (de 0,55 g/cm³ para 0,70 g/cm³) e, consequentemente, sua dureza.

Segundo relatos de Silva (2006), apesar da utilização cada vez mais frequente do CCB (cromo, cobre e boro), ainda não existem muitas informações em relação a aspectos ambientais e à disposição de resíduos da madeira tratada.

2.2.1 Aproveitamento de rejeitos de madeira tratada

Considerando-se o mercado expressivo da madeira tratada, os rejeitos provenientes desta indústria, oriundos de produtos fora de especificação, podem ser nocivos ao ambiente, quando não dispostos adequadamente. Segundo Lebow (2010), caso a madeira tratada seja colocada em serviço, anteriormente à conclusão das reações de fixação dos compostos ativos, o lançamento inicial do preservante no ambiente pode ser mais intenso. Além disso, quando estes resíduos apresentam-se sob a forma de maravalhas ou partículas, a pequena espessura aumenta a área passível de viabilizar perdas de substâncias por lixiviação (BERTOLINI 2011).

Outra questão são produtos pós-serviço, que se caracterizam como futuros rejeitos. Em muitos países, como Reino Unido (UK) e EUA, o CCA já possui usos restritos desde 2004 e vem, gradativamente, deixando de ser utilizado. Kamdem (2002) cita que o volume de resíduos de madeira tratada com CCA nos Estados Unidos, em 2002, foi da ordem de 8 milhões de m³, estimando que, em 2020, este volume seja de 19 a 20 milhões de m³, originários principalmente da construção civil. Estudos de Murphy et al. (2004), considerando-se o cenário do Reino Unido, apontaram o montante de 62.000 m³ de rejeitos pós-consumo de madeira tratada com CCA em 2004 e, considerando-se uma vida em serviço da madeira tratada com CCA de 50 anos, projeções futuras apontaram volume de rejeitos de 870.000 m³ no ano de 2061.

Conforme Montana Química (2010), o procedimento adequado para a destinação final dos resíduos de madeira tratada é a disposição em aterros devidamente registrados pelo Órgão Ambiental local, de acordo com a legislação ambiental municipal e estadual vigente. Além disto, não se devem reutilizar sobras/resíduos da madeira tratada na fabricação de produtos destinados à queima (carvão, briquetes) ou combustíveis, nem descartá-los a céu aberto. Isto se deve ao fato da substância preservante CCA ser considerada pelo IBAMA (2007) como de classe toxicológica e de risco ambiental tipo I, ou seja, extremamente tóxico.

O reaproveitamento de resíduos madeireiros pode reforçar ainda mais seu perfil ambiental, proporcionando um volume elevado de recurso secundário para a reciclagem em novos materiais avançados (ESHUN; POTTING e LEEMANS, 2012). Neste sentido alguns trabalhos têm sido desenvolvidos no que diz respeito ao aproveitamento de resíduos madeireiros, principalmente na produção de painéis de partículas, porém, a utilização dos rejeitos de madeira tratada tem sido pouco explorada.

Vick; Geimer e Wood (1996) produziram *flakeboards*, semelhantes aos painéis estruturais conhecidos recentemente como OSB (*Oriented Strand Board*), utilizando resíduos de madeira serrada de *Southern Pine* tratado com CCA e resina fenol-formaldeído, comparando-se os resultados com painéis produzidos com a mesma espécie sem tratamento preservante. Os autores obtiveram valores de MOR e MOE de 29 e 3842 MPa, respectivamente, que, apesar de satisfatórios, foram inferiores aqueles obtidos para painéis de madeira sem tratamento. As propriedades de inchamento em espessura e absorção de água apresentaram aumento de 19 % e 12 %. Segundo os autores, isto pode ser explicado devido ao CCA estar presente na parede das células, afetando a interação com o adesivo e com a água e, consequentemente, as propriedades dos painéis.

No caso de utilização do CCB, que se instala preponderantemente no lúmen celular, esta interação das partículas com adesivo pode ser facilitada e até mesmo a resistência à água apresentar-se superior, conforme verificado em painéis produzidos por Bertolini et al. (2013).

Clausen; Kartal e Muehl (2000) produziram painéis aglomerado de média densidade ($0,80 \text{ g/cm}^3$) com a adição de resina ureia-formaldeído em três configurações, empregando: resíduos de *Pinus* sp. (*Southern Pine*), resíduos da mesma espécie tratados com preservante CCA e resíduos biorremediados, anteriormente tratados com CCA. Melhores desempenhos foram alcançados com painéis produzidos apenas com a madeira tratada, por meio das propriedades de resistência à água (inchamento em espessura e absorção de água) e valores 75% superiores do módulo de elasticidade em relação ao mesmo produto fabricado com resíduos *in natura*.

Huang e Cooper (2000) abordaram em seus estudos a produção de painéis cimentícios com rejeitos de madeira tratada com CCA, provenientes de postes de *Pinus resinosa* Ait., com 10 anos em serviço. Os autores obtiveram melhor compatibilidade do reforço com o agregante em painéis fabricados com madeira tratada em comparação com madeira sem preservante, refletida no desempenho em relação à maior resistência na flexão e rigidez, tração perpendicular, inchamento em espessura e absorção de água do produto final. Além disso, notou-se menor lixiviação do cobre e arsênio quando incorporados à matriz cimentícia.

Kamdern et al. (2004) fabricaram compósitos de polietileno de alta densidade, reforçados com partículas de madeira de *Pinus* tratada com CCA, proveniente de postes pós-utilização, resultando em excelentes propriedades de rigidez e inchamento em espessura, atribuindo-se este desempenho à presença das substâncias preservantes em compósitos contendo resina plástica virgem e reciclada.

Li; Shupe e Hse (2004) produziram painéis *flakeboards* utilizando madeira tratada com CCA em diferentes proporções, proveniente de rejeitos pós-consumo de *guardrails*. Os autores observaram que a taxa de lixiviação estava altamente relacionada com o percentual de madeira utilizado nos painéis. No entanto, a resina fenol-formaldeído utilizada na adesão promoveu um papel positivo na redução da lixiviação de substâncias químicas. Considerando esta observação feita por Li; Shupe e Hse (2004), adesivos com maior resistência à água podem possivelmente ajudar a reduzir a lixiviação destes produtos que contêm madeira tratada.

Ferro (2013) notou para painéis OSB produzidos com partículas de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) tratada com CCA, usando 8, 10 e 12% de resina poliuretana à base de óleo de mamona, que, o melhor desempenho para inchamento em espessura e absorção de água foi obtido para painéis com as quantidades mais elevadas de adesivo.

O aproveitamento de rejeitos de madeira tratada também foi abordado para aplicação em vigas de MLC, produzidas a partir de madeiras (*Southern Pine*) tratadas com CCA e com pentaclorofenol, ambas reutilizadas. Pesquisadores determinaram as propriedades mecânicas, camadas de composição por meio de análise de ondas de tensão, análise de tensão de cisalhamento, retenção de preservante e delaminação (Piao et al 2009;. Piao e Monlezun 2010;. Piao et al 2010;. Piao et al 2011a; Piao et al . 2011b). Nestes estudos, as propriedades foram comparadas com valores obtidos para os produtos da mesma espécie de madeira, sem tratamento conservante, em condições de ensaio semelhantes. Em alguns casos, tais como estudos de Piao et al. (2009), as cruzetas laminadas de madeira tratada com CCA atenderam ao requisito mínimo de cisalhamento de 8,60 MPa, especificado na American Society for Testing and Materials - ASTM D2559.

2.3 Borracha de Pneu

2.3.1 Características dos pneus

O norte-americano Charles Goodyear descobriu e registrou, em 1841, o processo de vulcanização da borracha, dando início a uma nova era na utilização do material (GOODYEAR, 2013). Desde 1845, os pneus substituíram rodas de madeira e ferro devido, principalmente, às características da borracha de maior resistência, durabilidade e absorção de impacto com o solo, tornando os transportes mais funcionais e confortáveis (RODRIGUES, 2008).

Segundo o The Waste & Resources Action Programme - WRAP (2006), os pneus são produtos de constituição complexa, formado por inúmeros compostos de borracha, tipos de negro de fumo, cargas como argila e sílica, e produtos químicos/minerais adicionados para permitir ou acelerar a vulcanização. Possuem, além disso, tecidos e aço para reforço e estruturação. A Tabela 2 e Figura 1 apresentam, respectivamente, a composição e componentes da estrutura dos pneus.

Tabela 2 – Composição dos pneus em diferentes tipos de veículos. Fonte: WRAP (2006).

Constituintes	Tipo de Pneu		
	Veículos de passeio	Caminhões	Trator/Veículos Pesados
Borracha / Elastômeros ¹	47%	45%	47%
Negro de fumo ²	21.5%	22%	22%
Metal	16.5%	25%	12%
Matéria têxtil	5.5%	--	10%
Óxido de Zinco	1%	2%	2%
Enxofre	1%	1%	1%
Aditivos ³	7.5%	5%	6%
Materiais à base de carbono ⁴	74%	67%	76%

¹Caminhões e veículos pesados apresentam maior teor de borracha natural; ²A sílica substitui parte do negro de fumo em alguns tipos de pneus; ³Como exemplo as argilas, que podem ser substituídas, em parte por resíduos de pneus; ⁴Valor dependente da substituição da argila por borracha reciclada.

Figura 1 – Componentes da estrutura dos pneus. Fonte: Fundação Israel Pinheiro (2014).

Segundo Saiwari (2013), a borracha mais utilizada para pneus de automóveis é o copolímero estireno-butadieno (SBR). Outras borrachas utilizadas na fabricação de pneus incluem borracha natural (NR), borracha butílica (borracha isobutileno isopreno, IIR) e polibutadieno (BR), presentes em diversos componentes como: banda de rolagem (SBR, BR); cintas (NR); flanco ou parede lateral (NR, BR); carcaça (SBR, NR, BR), e talão (NR).

O processo de fabricação do pneu envolve a preparação da borracha e dos componentes descritos anteriormente para formar o produto final, levando em consideração aspectos como segurança, uniformidade de peso e geometria, simetria, controle de compostos de borracha, grau de vulcanização, repetibilidade do processo e rastreabilidade, entre outros. O processo de vulcanização destaca-se como um dos processos mais importantes da fabricação do pneu, objetivando dar consistência à borracha (ANIP, 2014).

A vulcanização é um processo no qual os materiais elastômeros ou borrachas são convertidos em uma cadeia tridimensional (ligações cruzadas) por meio da união de cadeias independentes, envolvendo altas temperaturas e adição de enxofre, ou substâncias como peróxidos, óxidos metálicos, etc. O material resultante apresenta redução na deformação permanente quando submetido a um esforço mecânico, produzindo um material essencialmente elástico. A borracha vulcanizada resulta em resistência mecânica superior no que diz respeito ao módulo de elasticidade, resistência à fadiga e abrasão (BHOWMICK e MANGARA, 1994).

2.3.2 Cenário do emprego de pneus no Brasil

Segundo Martins (2005), a intensa propulsão da indústria automobilística, desde o início do século XX, propiciou o desenvolvimento de segmentos destinados a seu suprimento, destacando-se as empresas de pneus.

O Brasil já é um dos maiores mercados para a indústria de pneus na América Latina. Em 2013, foram produzidos no país cerca de 68,8 milhões de pneus, que somados à importação, totalizou a quantidade em vendas de 72,6 milhões de pneus, segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2014). Goldenstein, Alves e Barrios (2007) citam que as vendas são destinadas a três segmentos diferentes: 26% às montadoras, 42% ao mercado de reposição e 32% ao mercado externo, sendo neste último caso os Estados Unidos (EUA), França, Argentina e México. Segundo a mesma fonte, no período de 2004 a 2007, as empresas produtoras no país (totalizando 12 plantas industriais de empresas transnacionais) investiram num aumento de cerca de 30% da capacidade instalada no país, motivadas pelo aumento da demanda no mercado interno, cenário favorável às exportações e deslocamento da produção da indústria mundial de pneus para países de baixo custo salarial.

2.3.3 Reciclagem da Borracha de Pneu Inservível

Um pneu é considerado inservível quando não há mais condição de ser utilizado para circulação ou reforma (CEMPRE, 2014). Fioriti e Akasaki (2004) definem os resíduos de pneus como “intratáveis”, devido à sua decomposição lenta e tempo de duração de aproximadamente 240 anos. Segundo a WRAP (2006), alguns pneus produzidos pela Goodyear possuem 30 tipos de borracha sintética, 8 tipos de borracha natural, 8 tipos de negro de fumo e mais de 40 produtos químicos entre ceras, óleos, pigmentos, sílicas e argilas diferentes. Neste sentido, a borracha de pneu é um produto de composição complexa, o que dificulta ainda mais sua reciclagem.

Lagarinhos e Tenório (2008) destacam que a Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em vigor desde 1999, proibiu o descarte

inadequado dos pneus inservíveis e obrigou os fabricantes e importadores a dar destinação final adequada ao rejeito em território nacional. As metas são progressivas e, desde 2005, a cada quatro pneus produzidos ou importados novos, cinco pneus usados/inservíveis deveriam ser reciclados. Porém, esta não é a atual realidade, já que o destino final não depende somente dos fabricantes, mas também dos seus consumidores (GIACOBBE, 2008).

Problemas de logística e de fiscalização diminuem o número de pneus que são dispostos adequadamente, segundo informações da indústria. A ReciclAnip, entidade ligada à ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, foi responsável pela coleta e destinação ambientalmente correta de mais de 183 mil toneladas de pneus inservíveis, quantidade equivalente a 36,6 milhões de unidades de pneus de carros de passeio, durante 2013 (CEMPRE, 2014).

Outra questão são alguns dos pneus importados, desconhecidos pelo seu padrão de qualidade e durabilidade. Estes pneus alcançam preços de 20% a 40% inferiores àqueles fabricados pelas empresas associadas à ANIP (GOLDENSTEIN, ALVES e BARRIOS, 2007). Neste caso, devem ser considerados também os resíduos oriundos destes pneus, possivelmente contabilizados nas estimativas.

Segundo Gardin; Figueiró e Nascimento (2010), entre as diversas alternativas para a destinação de pneus inservíveis que são recomendadas pela legislação ambiental, destacam-se a reciclagem, utilização na pavimentação asfáltica e emprego como combustível nas indústrias cimenteiras. Para que estas alternativas sejam viáveis, é necessária a existência de uma logística reversa para o recolhimento dos pneus inservíveis, conforme previsto na Lei N° 12.305, aprovada em 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. De acordo com Poll (2009), o reaproveitamento ambientalmente correto também é aquele que possa gerar um produto comercializável e útil para sociedade.

A Tabela 3 apresenta os principais destinos e possibilidades de reutilização da borracha de pneu.

Tabela 3 – Possibilidades de reutilização da borracha de pneu inservível. Fonte: Adaptado de Saiwari (2013).

Uso	Processamento	Aplicação
1. Aterros sanitários	Aterros sanitários em geral Mono-aterros*	-
2. Reusos	Reuso como pneu; Reuso em outras aplicações	Recauchutagem; Barreiras; Recifes artificiais; Equipamentos de playground;
3. Valorização energética	Incineração	Obtenção de energia
4. Obtenção de matérias-primas	Pirólise	Produção de negro de fumo, óleo e gás
5. Reciclagem de materiais	Moagem Recuperação Modificação de superfície Outros produtos	Granulação ou transformação em novos produtos de borracha Construção civil Asfalto

*Aterros que admitem apenas um tipo de resíduo, aproximadamente homogêneo.

Estudos têm sido desenvolvidos abordando aplicações que exploram as características deste material, principalmente voltadas aos compósitos cimentícios, como capacidade de deformação e comportamento menos frágil que o concreto convencional. Todavia, carecem pesquisas abordando as propriedades termoacústicas deste material. Giacobbe (2008) constatou em seus estudos que a adição de borracha de pneus ao concreto reduziu o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, porém cita a possibilidade de empregos como isolamento térmico e acústico, por ser mais flexível e capaz de absorver calor e impacto.

2.4 Espumas poliuretanas

Segundo Szycher (2012), Otto Bayer buscava sintetizar uma fibra polimérica para competir com o nylon quando desenvolveu o primeiro poliuretano, em 1937. A química do uretano faz uso das reações de isocianatos orgânicos com compostos que contém hidrogênios ativos. Quando isocianatos polifuncionais e um composto intermediário com pelo menos dois hidrogênios ativos por mol reagem em proporções adequadas, são resultados polímeros que

podem produzir espumas rígidas ou flexíveis, revestimentos, adesivos e selantes. Basicamente um grupo isocianato reage com os grupos hidroxila de um polioliol, formando ligações repetidas de uretanos.

Serves (2007) menciona que as poliuretanas (PU) são muito utilizadas na produção de espumas rígidas, na qual o agente expensor da reação em geral é o CO₂. As espumas são formadas pela reação entre os isocianatos multifuncionais, o polioliol e a água inserida na formulação, entre outros catalisadores específicos à base de aminas e sabões metálicos.

De acordo com Saint-Michel; Chazeau e Cavaillé (2006), as espumas PU apresentam propriedades ligadas à sua estrutura, composta por “células” abertas ou fechadas, com certa regularidade e forma, e também às propriedades intrínsecas do componente do polímero. Em geral, esta estrutura confere elevada capacidade de absorção de energia e baixa condutividade térmica.

As espumas poliuretanas são classificadas em: flexíveis, normalmente aplicadas nos segmentos de colchões, estofados e assentos automotivos; semirrígidas, aplicadas na indústria automobilística como painéis, para-choques, descanso-braços, etc; e rígidas, normalmente destinadas ao isolamento térmico em geladeiras, câmaras frigoríficas e condicionamento termoacústico na construção civil (VILAR, 2004).

Devido à excelente capacidade de isolamento térmico, propriedades mecânicas (relação resistência-peso), além da durabilidade, versatilidade e consideráveis propriedades acústicas, as espumas rígidas de poliuretano vem se sobressaindo no setor da construção civil (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2013; AMARAL et al. 2012). As diversas aplicações são impulsionadas pelo desenvolvimento de novos produtos como painéis modulares ou sanduíche para habitação, sistemas de cobertura e geocompósitos (HATAKEYAMA et al. 2012).

Em geral, as espumas poliuretanas são comercializadas como peças pré-moldadas em diversas espessuras, dimensões e densidade, porém também podem ser aplicadas por pulverização (em forma de spray) e por injeção. Na pulverização, comumente utilizada em isolamento térmico de grandes áreas de telhado ou colunas, aplica-se a mistura no local previamente preparado, podendo posteriormente receber diversos acabamentos, como pinturas epóxi ou tintas à base de poliuretano. No caso da injeção, esta mistura é formada em maquinário específico com cavidades, as quais são preenchidas pela ocorrência da expansão da espuma (CARDOSO, 2010).

Embora estes polímeros ofereçam muitas vantagens para o cotidiano, podem requerer longos períodos de degradação e, portanto, serem acumulados no ambiente. Sabe-se que a

biodegradação dos materiais de PU depende da sua estrutura, condicionada por vários fatores, como a natureza do poliol utilizado (AMARAL et al. 2012).

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando-se insumos de origem renovável, os chamados polióis, que são um dos principais componentes destas espumas, junto ao isocianato. De acordo com Vaughan et al. (2011), isto se deve não somente aos elevados custos do petróleo e diminuição de sua disponibilidade, mas à busca por produtos “verdes” que reduzem o consumo de energia e emissão de carbono dos produtos acabados, podendo também agregar características favoráveis, com custo benefício adequado.

Estudos têm se concentrado principalmente com trabalhos focando óleos à base de mamona, soja e canola (Narine et al. 2007). Conforme Vaughan et al. (2011), estes polióis conferem às espumas estruturas celulares semelhantes às de produtos convencionais à base de petróleo.

2.4.1 Espumas Poliuretanas à base de óleo de mamona

Segundo Cardoso (2010), os materiais poliuretanos (PU) à base de mamona foram propostos em pesquisas de desenvolvimento e utilização na década de 1940, aplicados principalmente como tintas e vernizes. Porém, com o advento dos polióis poliéteres de baixo custo, no final da década de 1950, os derivados de óleo de mamona foram restritos, na época, a utilizações mais nobres.

Devido às muitas preocupações em todo mundo para a busca de materiais de menor impacto à sociedade como um todo e ao meio-ambiente, com características tanto de reutilização, quanto biodegradáveis, as resinas PU à base de óleo de mamona voltaram a ser exploradas para diversas aplicações (NARINE, et. al. 2007; ARANGUREN, RÁ CZ e MARCOVICH, 2007). Rezende et al. (2001) explicam que este biomaterial têm sido aplicado em grande maioria no segmento da saúde, como implantes nos tecidos moles, devido à sua alta compatibilidade e trabalhabilidade.

Diversas pesquisas têm sido realizadas para aplicações da resina poliuretana à base de mamona na construção civil como adesivo, conforme citado anteriormente. Porém, no caso de espumas para isolamento são poucos os estudos neste sentido, conforme pesquisas de: Aranguren, Rác z e Marcovich (2007), com a fabricação de compósitos de espumas PU à base

de mamona misturadas às fibras de *Pinus* ou de cânhamo para destinação em painéis interiores de automóveis; Mosiewicki et al. (2009), com espuma PU à base de mamona e introdução de pó de madeira de *Pinus* como carga; Borges (2009), com compósitos de poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmico; Cardoso (2010), com caracterização de espuma PU derivada da mamona para isolamento térmico na construção civil; Oliveira (2010) com carga em diferentes teores de resíduos de pneus inservíveis em espuma PU à base de mamona; e Lopes (2009), analisando o desempenho térmico de espumas PU à base de mamona empregadas em subcoberturas. Em grande parte dos trabalhos citados, as espumas PU à base de mamona foram empregadas utilizando-se outros materiais como carga.

2.5 Propriedades Térmicas dos Materiais

Moreschi (2010) define as propriedades térmicas como a resposta de um material a um estímulo térmico (aumento ou redução de temperatura). Segundo o autor, a propriedade de isolamento térmico de um material está relacionada diretamente com sua condutividade térmica, propriedade definida como a medida da taxa de fluxo de calor através de materiais submetidos a gradiente de temperatura. Costa (2008) destaca que os materiais isolantes possuem baixa condutividade térmica (λ) e normalmente são porosos. A Tabela 4 mostra a condutividade térmica de alguns materiais.

Tabela 4 - Condutividade térmica de alguns materiais. Fonte: Moreschi (2010).

Materiais	λ (Kcal/m.h.°C)
Vácuo	0
Ar	0,0216
Poliestireno expandido (isopor)	0,035
Lã de vidro (20 kg/m ³) seca	0,05
Chapa aglomerada	0,07 - 0,12
Pinheiro do PR. (<i>Araucaria angustifolia</i>)	0,12
Tijolo	0,4
Água	0,5
Concreto armado	1,75
Cobre	50
Ferro	330

A resistência térmica de um material é definida como o quociente da diferença de temperatura analisada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor (quociente do fluxo de calor que atravessa uma superfície pela área da mesma), em regime estacionário (ABNT NBR 15220-1: 2003). A elevada resistência térmica dos materiais isolantes se baseia na baixa condutibilidade do ar contido em seus vazios; consequentemente este material terá menor densidade (COSTA, 2008). A Figura 2 apresenta a relação entre densidade e condutividade térmica de alguns materiais.

Figura 2 – Relação entre densidade e condutividade térmica de alguns materiais. Fonte: Westphal, Marinoski e Lamberts (2001).

De acordo com Moreschi (2010), a capacidade de condução depende principalmente da composição química, da macroestrutura e da textura do material. Desta maneira é possível estabelecer, como no caso de paredes isolantes, a melhor composição em termos de peso de material na composição e do custo do produto final (COSTA, 2008). A Tabela 5 a seguir apresenta uma comparação entre alguns materiais e uma parede de tijolo, de acordo com a sua capacidade isolante. A Figura 3 demonstra alguns dos isolantes térmicos convencionais de acordo com sua classificação.

Tabela 5 - Equivalência em termos de isolamento térmico. Fonte: Costa (2008).

Espessura isolante de 1 cm		Espessura de tijolo de
Madeira de pinho	Equivale a	6 cm
Papelão Corrugado		10 cm
Cortiça, lã de vidro		18 cm
Eucatex isolante		19 cm
Eucatex frigorífico		30 cm
Poliestireno expandido		31 cm
Espuma rígida de poliuretano		42 cm

Figura 3 - Materiais isolantes térmicos convencionais. Adaptado de: Westphal, Marinoski e Lamberts (2001).

É possível estabelecer algumas das características térmicas dos materiais para satisfazer as exigências de conforto de uma edificação, conforme o que define a norma brasileira ABNT NBR 15220 (2003). Por meio de ensaios específicos é possível determinar as características de Resistência Térmica e Condutividade Térmica, para composições formadas por diversas camadas, com equipamento de construção especificada pelo documento normativo. Em paredes para isolamento térmico, conhecendo-se as propriedades térmicas de cada material, podem ser calculadas a Transmitância Térmica, Capacidade Térmica, Atraso Térmico e o Fator Ganho de Calor Solar.

De acordo com Costa (2008), a determinação de tais características é essencial para evitar trocas térmicas indesejáveis e manter a temperatura de uma parede isolante a níveis

adequados. Este equilíbrio térmico é determinado quando o ganho de calor interno é baixo em períodos quentes e com perda mínima de calor no frio. Todavia Costa (2008) enfatiza que, um material isolante deve apresentar também propriedades como: boa resistência mecânica; ser imputrescível e inatacável por pragas; ser incombustível; não ser higroscópico e apresentar, se possível, baixa porosidade à penetração do vapor de água.

2.5.1 Métodos de determinação das propriedades térmicas dos materiais

Existem métodos consagrados e normatizados para determinar as propriedades térmicas dos materiais. A norma ABNT NBR 15220 (2003) – Partes 4 e 5 - cita dois métodos para determinação da resistência térmica e da condutividade térmica dos materiais, conforme descritos a seguir: Método da Placa Quente e Método Fluximétrico.

O Método da Placa Quente é um método absoluto, em regime permanente, para determinação das propriedades citadas de materiais homogêneos e isotrópicos; materiais porosos termicamente homogêneos e materiais termicamente não homogêneos. O Método Fluximétrico utiliza técnicas fluximétricas, medindo a resistência térmica, em regime estacionário, por meio de amostras sob a forma de placas planas, deduzindo-se por cálculo a condutividade térmica. O resultado da medição é a resistência térmica individual do(s) corpo(s) de prova ensaiado(s), sendo possível então calcular sua condutividade térmica, caso sejam constituídos de material homogêneo.

Estes métodos citados por norma e outros também desenvolvidos com o mesmo intuito são classificados conforme suas peculiaridades na obtenção destas propriedades.

Os métodos para obtenção das propriedades térmicas podem ser divididos em: diretos e indiretos. Nos diretos, como o método da Placa Quente, mede-se a condutividade térmica considerando-se resultados de experimentos. Nos indiretos, mede-se experimentalmente certa propriedade térmica e a partir dela obtém-se a condutividade (SANTOS, W. N., 2005).

Outra classificação, também citada por Santos, W. N. (2005) refere-se aos métodos experimentais, quanto à adoção ou não de padrões, caracterizados como absolutos ou comparativos.

Para os métodos absolutos, a medida da condutividade térmica é direta, dispensando o uso destes padrões como comparativo, como exemplo, o Método do Fio Quente (SANTOS, W. N. 2005). Este método consiste no ajuste de uma resistência e termopar no centro de uma

amostra, na qual a corrente elétrica constante que passa através do fio libera uma quantidade também constante de calor, por unidade de tempo e comprimento, se propagando através do material (CARDOSO, 2010).

Os métodos comparativos são aqueles que necessitam de um ou mais padrões calibrados, utilizados como referência, como no Método da Coluna Fracionada. Este método, estacionário e comparativo, possui uma coluna, aquecida por um forno, composta pelo padrão - amostra estudada - padrão novamente. Esta técnica foi desenvolvida para a determinação da condutividade térmica em atmosfera não oxidante (SANTOS, W. N. 2011).

2.6 Absorção Sonora

Santos Neto (2006) relata que a importância do projeto acústico é demonstrada por gregos e romanos, desde a Antiguidade, com os teatros ao ar livre. Recentemente, o crescimento populacional, da indústria e suas máquinas e de outros setores da economia, em conjunto com o surgimento de edificações mais esbeltas, tem colaborado para aumentar o desconforto acústico para a população. Segundo Fernandes (2002), o ruído destaca-se atualmente como um dos meios de poluição que afeta a maior quantidade de pessoas. Desde 1989, a Organização Mundial da Saúde passou a tratar o ruído como problema de saúde pública.

De acordo com Oliveira (2010), o conforto acústico abrange conceitos de isolamento e condicionamento acústico. O isolamento refere-se ao confinamento de ambientes por meio de barreiras, empregando-se geralmente materiais densos, como concreto, aço ou vidro. Já o condicionamento consiste na redução ou eliminação dos níveis de reverberação em um ambiente, garantindo um bom nível de compreensão das palavras, por meio da absorção sonora.

O intervalo de tempo no qual o som permanece no ar interfere no conforto acústico do ambiente. Quando se percebe, em um ambiente, uma queda de 60 dB no nível sonoro durante um intervalo de tempo, tem-se o tempo de reverberação neste local. Devido ao volume e à composição de seus materiais, cada ambiente terá seu próprio tempo de reverberação. Sendo assim, torna-se necessário o emprego de materiais de absorção para minimizar esta reverberação do som (MOREIRA, 2009).

Segundo Nakamura (2006), a capacidade de absorção do som pode ser definida como o quanto o material pode dissipar a energia sonora que incide sobre ele, por meio da transformação da energia mecânica vibratória em energia térmica.

Everest (2001) explica de modo simplificado a dissipação do som através de um material, que ocorre por diferentes fenômenos, conforme a Figura 4. Se uma onda sonora (S), em movimento através do ar, atinge uma parede de blocos de concreto coberta por um material acústico, parte da energia é refletida (A) pela superfície do material absorvente, ocorrendo uma perda de calor (E) e outra parcela é absorvida pelo material acústico. Parte do som penetra o material acústico (linha cheia), sendo a direção de seu trajeto refratada para baixo, pois este material é mais denso que o ar, existindo outra perda de calor (F) devido à resistência ao atrito que o material oferece para a vibração das partículas do ar. Quando o som atinge a parede de blocos de concreto, ocorre a reflexão (B) e perda de calor (H). Quando atinge finalmente o limite da parede de blocos, a energia, ainda mais fraca, sofre reflexão (C) e refração (D), com perda de calor (I, J e K).

Figura 4 – Dissipação do som através de uma parede de blocos de concreto coberta por material absorvente. Fonte: Everest (2001).

A eficiência acústica de um material de absorção é expressa em termos de seu coeficiente de absorção sonora, definido como a fração da energia de ondas sonoras incidentes absorvidas pelo material. O coeficiente de absorção não possui, geralmente, um valor constante para um dado material, mas pode variar como uma função da frequência do som, o ângulo de incidência das ondas sonoras no material, bem como o método de montagem deste material para obtenção do produto final. Entretanto, os coeficientes de absorção sonora fornecem uma maneira útil para descrever as propriedades de absorção

acústica de materiais para fins de comparação e seleção, desde que o método de determinação seja padronizado (GODSHALL e DAVIS, 1969).

Moreira (2009) destaca que é mais conveniente a utilização de um coeficiente de absorção de incidência aleatório, no qual seu cálculo leve em consideração uma média entre todos esses ângulos de incidência, pois em grande parte dos espaços o som incidente forma diversos ângulos em proporções quase iguais. Deste modo possibilita-se chamar-se especificamente de coeficiente de absorção (α) do material. No caso de elementos arquitetônicos, utilizam-se para este cálculo do coeficiente, seis faixas de oitavas de frequências que variam de 125 Hz a 4 kHz, obtidos através de ensaios em câmaras reverberantes ou em tubos de impedância.

Considerando-se uma onda sonora em propagação, a frequência é definida como o número de ondas que passam por um determinado referencial em um intervalo de tempo, com unidade em Hz - ciclos por segundo (FERNANDES, 2002). A faixa de frequências situadas na gama do audível, ou seja, captadas pelo ouvido humano são chamadas de bandas de frequência e estão centradas nos 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.25k, 1.6k, 2k, 2.5k, 3.15k, 4k, 5k, 6.3k, 8k, 10k, 16k e 20k Hz (OLIVEIRA, 2009). Dentro da faixa audível, o ouvido percebe as frequências de uma maneira não linear, sendo assim, é estabelecido um intervalo de frequências com relação entre estas igual a 2, chamado “banda de oitava” (FERNANDES, 2002). Segundo a norma ISO 354 (1985), as medidas para determinação da absorção acústica podem ser conduzidas nas seguintes frequências centrais das bandas de 1/3 de oitavas (relação $2^{1/3}$): 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.25k, 1.6k, 2k, 2.5k, 3.15k, 4k, 5k Hz.

De acordo com Simões (2011), o coeficiente de absorção sonora varia de 0 a 1: $\alpha = 0,01$ indica a absorção de 1% da energia do raio sonoro e devolução de 99% para o ambiente, como, por exemplo, materiais de superfícies mais lisas; e $\alpha = 1,00$ significa absorção de 100% da energia do raio sonoro e devolução de 0% para o ambiente, como, por exemplo, uma janela aberta. Verifica-se que a maior absorção sonora dos materiais porosos se dá em altas frequências, os sons agudos, enquanto a absorção dos sons graves e médios depende de grandes espessuras do material, sendo neste caso mais complexa e tornando-se dependente do material e montagem adequada.

A ABNT NBR 12179 (1992) apresenta o coeficiente de absorção de alguns materiais nas bandas de faixas de oitavas citadas. A Tabela 6 cita esta característica para alguns materiais.

Tabela 6 – Coeficiente de absorção acústica (α) de alguns materiais. Adaptado ABNT NBR 12179 (1992).

Material	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Materiais de construção usuais, densos</i>						
Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Superfície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
<i>Materiais porosos e isolantes</i>						
a) Fibras Naturais						
Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, em parede rígida	0,04	0,13	0,52	0,75	0,61	0,72
Chapa leve de lã de madeira, com espaço de 5cm, vazio	0,25	0,33	0,5	0,65	0,65	0,7
Chapa leve de lã de madeira, com espaço de 5cm, com absorvente acústico	0,18	0,33	0,8	0,9	0,8	0,83
Chapa leve de lã de madeira, de 50 mm, diretamente em parede rígida	0,11	0,33	0,9	0,6	0,79	0,68
Chapas de cavacos de madeira, de 13 mm, com espaço de 5cm até a parede, vazio	0,24	0,2	0,19	0,2	0,26	0,45
b) Materiais sintéticos						
Espuma de uréia, 50 mm, 15 kg/m ³ , diretamente em parede densa	0,12	0,2	0,45	0,65	0,7	0,75
<i>Portas, janelas e aberturas</i>						
Janela Aberta	1	1	1	1	1	1
Madeira compensada de 3mm, a 50mm da parede, espaço vazio	0,25	0,34	0,18	0,1	0,1	0,06
Madeira compensada de 3mm, a 50mm da parede, espaço vazio, amortecimento nas bordas	0,46	0,47	0,23	0,12	0,1	0,06
Madeira compensada de 3mm, a 50mm da parede, espaço enchido de lã mineral	0,61	0,65	0,24	0,12	0,1	0,06
<i>Sistemas absorventes especiais</i>						
Chapa perfurada, forrada de lã de vidro ou cassa na frente, de 40mm a 50 mm de espaço vazio	0,01	0,03	0,1	0,16	0,17	0,2
Chapa perfurada de 3 mm, proporção de furos cada 16%, forrada de lã de fibra mineral de cada 0,5 mm, na frente de 45mm a 50 mm de espaço vazio	0,01	0,1	0,19	0,25	0,46	0,21

Oliveira (2009) destaca que o aspecto mais importante em materiais absorventes sonoros é sua estrutura, seja fibrosa ou porosa, permitindo a passagem de fluxo de ar para que as ondas sonoras penetrem nos poros ou nos interstícios das fibras, dissipando a energia acústica em energia térmica. Alguns materiais possuem essa característica, oferecendo também isolamento térmico, chamados de não convencionais, sendo estes: lã de vidro; lã de rocha; espumas elastoméricas; fibra de coco e outras fibras vegetais, etc. (CATAI, PENTEADO e DALBELLO, 2006). Conforme Moreira (2009), os materiais mais utilizados, com estas características, são lã de vidro e painéis de madeira.

Segundo Everest (2001), outras características dos materiais podem interferir na absorção do som, conforme descrito a seguir. Os efeitos destas variáveis em determinados materiais se apresentam na Figura 5.

- Espessura: materiais mais espessos são melhores absorventes, mas essa lógica é válida principalmente para as frequências mais baixas;
- Densidade: apesar de muitas vezes relacionar-se materiais mais densos, duros e frágeis a uma menor absorção do som, este fator em muitos casos é pouco significativo neste desempenho acústico. Teoricamente, materiais menos densos possuem maior quantidade de espaços para que a absorção ocorra, enquanto naqueles menos densos ocorre maior reflexão do que absorção pela sua superfície.
- Espaço de ar: maior absorção do som em baixas frequências de absorção pode ser alcançada adotando-se um espaçamento entre o material e a parede, limitando-se a determinadas distâncias.

Figura 5 – Efeito das variáveis de uma amostra de fibra de vidro na capacidade de absorção do som.

Fonte: Everest (2001).

2.6.1 Mecanismos de absorção sonora

Um campo sonoro de um determinado espaço é condicionado por diversos fatores como concepção arquitetônica e do mobiliário existente, das pessoas nele inseridas e dos materiais que revestem as suas superfícies expostas. Sendo assim, o projetista deve escolher os materiais de revestimento conforme seu mecanismo de absorção, criando condições de qualidade acústica. Materiais de diferentes mecanismos podem ser utilizados em um mesmo ambiente, de modo a equilibrar a absorção nas frequências desejadas (MARTINS, 2008).

Santos, J. L. P. (2005) cita que, existem basicamente três tipos de absorventes sonoros, dependendo do mecanismo de absorção e transformação das energias das ondas sonoras:

a) Materiais porosos ou fibrosos de células de ar abertas

Estes materiais permeáveis ao som, rígidos ou flexíveis, esponjosos ou fibrosos, contêm finos canais com comunicação interior entre si. A onda de som incidente produz uma pressão sonora que faz vibrar o ar presente nos poros, transformando a energia sonora por mecanismos de atrito, gerando perdas de energia sob a forma de calor. Geralmente absorvem sons agudos, com maior absorção do som em altas frequências.

b) Pannel vibrante, membrana ou diafragma

Neste mecanismo a absorção ocorre devido à porosidade do material e também pela ressonância da composição. Este sistema é constituído de um painel, geralmente de pequena espessura, fixado a certa distância de uma superfície rígida, com uma camada de ar confinada entre as superfícies (Figura 6).

Os absorvedores do tipo painel vibrante, ou absorvedores diafragmáticos, possuem como princípio sua excitação por ondas sonoras e, por consequência, ocorre à dissipação por amortecimento ao vibrar por ressonância na frequência de excitação. Estes painéis possuem uma faixa de frequência na qual o painel vibra pela excitação por ondas sonoras, havendo perda de energia por fricção. Esta frequência de ressonância pode ser calculada pela Equação 1.

Figura 6 – Exemplo de painel vibrante. Fonte: Santos, J. L. P. (2005).

$$Fr = \frac{600}{\sqrt{m \times d}} \quad (1)$$

Onde: Fr é a frequência de ressonância do sistema; m é a densidade superficial do painel (kg/m^2) e d representa a distância entre o painel e o fundo da caixa (cm).

Os painéis vibrantes são utilizados geralmente na absorção de sons graves de baixa frequência. No entanto, se preenchido com material absorvente sonoro, pode favorecer a absorção sonora em altas frequências, aumentando a eficiência de absorção nos agudos.

c) Ressonadores

Nos ressonadores, o mecanismo de absorção se baseia na capacidade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância, que é função das características geométricas do sistema. Trata-se de painéis perfurados, nos quais seus orifícios comportam-se como um gargalo de uma garrafa e o ar contido no espaço entre o painel e a parede simula o corpo da garrafa. A massa de ar do pescoço funciona como um êmbolo ligado a uma mola (ar do volume da garrafa), conforme a Figura 7. Geralmente este sistema absorve as frequências médias e é bastante seletivo, apresentando a absorção acústica máxima numa frequência de ressonância própria (Equação 2).

Figura 7 – Princípio do sistema dos ressonadores. Fonte: Santos, J. L. P. (2005).

$$Fr = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(1,6r + l)V}} \quad (2)$$

Onde: c representa a velocidade do som; r é o raio da perfuração; l é o comprimento da perfuração e V é o volume da caixa de ar.

2.6.2 Métodos para determinação da absorção sonora

Segundo Oliveira e Teodoro (2005), a avaliação da absorção sonora de materiais aplicados para o conforto acústico pode ser realizada por alguns métodos conhecidos, como: a Câmara Reverberante, descrita na norma ISO 354 (1985), no qual amostras são submetidas a um campo com ondas sonoras incidentes em todas as direções, sendo as curvas de absorção determinadas indiretamente por medidas de tempo de reverberação; o Método *in situ*, conforme ISO 13472-1 (2010), com amostras submetidas à incidência de ondas em campo livre a certo ângulo desejado e medição por meio de aparelhos específicos; e o Tubo de Impedância, de acordo com ISO 10534-1 (1996), no qual o coeficiente de absorção é obtido pela incidência normal de ondas planas em direção perpendicular às amostras, contidas em um tubo usado em conjunto com um gerador de sinais, um filtro e um medidor de nível. Dentre os métodos citados, os mais utilizados para este fim são detalhados a seguir.

a) Câmara Reverberante

No método da câmara reverberante, as amostras são submetidas a um campo com ondas sonoras incidentes em todas as direções (campo difuso) e curvas de absorção são determinadas indiretamente por medidas de tempo de reverberação (ISO 354, 1985). Segundo a norma ISO 354 (1985), o tempo de reverberação é definido como o tempo de decaimento do nível da pressão sonora num decréscimo de 60 dB após interrupção da fonte sonora. Os coeficientes de absorção sonora são usualmente determinados nas seis faixas de oitavas de frequências de: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

Segundo Everest (2001), a câmara reverberante é representada por uma grande sala com paredes, cobertura e pisos altamente reflexivos (Figura 8). O tempo de reverberação destas salas é muito longo e, conseqüentemente, a medida se torna muito precisa. Para realização do ensaio, o material é disposto no chão da câmara, preenchendo uma área especificada por norma e são tomadas as medidas do tempo de reverberação deste ambiente com a amostra. Segundo Moreira

(2009), o coeficiente de absorção sonora é então obtido levando-se em consideração os tempos de reverberação da sala vazia e da sala contendo a amostra.

A construção da câmara é muito importante para garantir as muitas frequências modais e para equalizar o modo de espaçamento, tanto quanto possível. Outras variáveis a serem trabalhadas são a posição da fonte sonora, o número e posições dos microfones, além da utilização de “placas” rotativas para assegurar adequada difusão do som (EVEREST, 2001).

Figura 8 – Câmara reverberante. Fonte: Patrício e Patraquim (2008).

b) Tubo de Impedância

Propriedades acústicas tais como coeficiente de absorção sonora, impedância, admitância e fator de reflexão podem ser obtidas por meio de equipamentos chamados tubo de impedância ou tubo de ondas estacionárias, conforme metodologia estabelecida pela norma ISO 10534-1 (1996).

O princípio do método empregado neste equipamento consiste em um tubo no qual em uma das extremidades coloca-se a amostra em estudo e na extremidade oposta situa-se um alto-falante conectado a um gerador de sinais (MARTINS, 2008). Segundo Moreira (2009), o alto-falante é conectado a um gerador de sinais senoidais e a um amplificador, produzindo-se dentro do tubo uma onda estacionária. Um microfone ou sonda de

microfone, inserido na extremidade do tubo, capta a pressão acústica da onda estacionária. A leitura do nível de pressão acústica é realizada através do sinal amplificado do microfone, permitindo também variar a distância entre a amostra e o ponto de medida da leitura. No tubo de impedância, existem somente ondas planas excitadas por tons puros que estão abaixo da frequência de corte (Figura 9).

Figura 9 – Representação do tubo de impedância. Fonte: Everest (2001).

As restrições na validação do coeficiente de absorção sonora (α) determinado no tubo de impedância estão relacionadas à incidência do som apenas perpendicularmente à amostra e à excitação acústica com frequências puras (não em bandas de frequências), entre 100 Hz e 1000 Hz para corpos de prova de 10 cm de diâmetro, e entre 1300 e 6300 Hz para amostras de 3 cm de diâmetro. Neste caso existe a possibilidade da amostra não ser representativa devido às suas limitações de tamanho. No entanto, a norma ISO 10534-1 (1996) permite correções dos valores obtidos para situações próximas às reais, onde a incidência do som é aleatória - campo difuso (MOREIRA, 2009).

Trata-se de um método altamente reprodutível, proporcionando o emprego de pequenas amostras para ensaio. Tal método é utilizado principalmente para amostras de materiais absorventes porosos/fibrosos, não sendo aconselhável para materiais absorvedores que dependem da área para o efeito, tais como painéis de vibração e grandes absorvedores do tipo membranas (EVEREST, 2001).

Atualmente, os tubos de ondas estacionárias podem ser empregados também na determinação da perda de som, no qual a amostra é posicionada no centro do tubo (Figura 10). A fonte de som (alto-falante), posicionada em uma das extremidades do tubo, gera ondas

sonoras aleatórias estacionárias, que se propagam como ondas planas. As ondas planas atingem a amostra posicionada em um suporte, no qual parte destas ondas é refletida e volta para o tubo de origem (fonte), parte é absorvida pela amostra de material e outra parcela das ondas passa através da amostra para o tubo de recepção. Por meio da medição da pressão sonora em quatro locais fixos (dois no tubo de fonte e dois no tubo de recepção) e do cálculo da função de transferência complexa, utilizando um analisador de frequência digital de quatro canais, é possível determinar a perda de transmissão do som do material. A gama de frequência utilizável depende do diâmetro do tubo e do espaçamento entre as posições do microfone. Este método é descrito pela norma ASTM E2611 – 09 “*Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*” (BRÜEL & KJÆR, 2012).

Figura 10 – Esquema do tubo de impedância para determinação da perda de transmissão do som.

Fonte: BRÜEL & KJÆR (2012).

2.7 Pesquisas no âmbito de painéis e compósitos com propriedades térmicas e acústicas

Segundo a Revista Sistemas Prediais (2011), o isolamento térmico e acústico está diretamente ligado ao conceito de edifícios verdes, considerando não só a economia de energia *versus* a eficiência térmica das construções, mas também o cenário de um mercado cada vez mais consciente da necessidade da utilização de materiais que não agredam o meio

ambiente. Além dos parâmetros necessários na prática da boa engenharia, as normas técnicas estão cada vez mais cuidadosas na definição dos produtos a serem aplicados neste segmento.

Neste sentido, estudos têm sido promovidos na busca por materiais proveniente de recursos renováveis, com menor impacto ambiental desde a extração até sua obtenção, ou uso de rejeitos de processos que agreguem propriedades satisfatórias a painéis para isolamento.

Estudos de Ghosh; Sengupta e Naskar (2010), sobre painéis de partículas de resíduos agroindustriais, abordaram o efeito do tipo de resíduos (folha de palmeira, vara de juta e serragem) nas propriedades de inchamento em espessura e impacto Izod, além das características acústicas e térmicas destes painéis, comparando-se as propriedades destes entre si e em relação ao painel compensado. Foram preparados painéis de partículas de cada material e também painéis com misturas de folhas de palmeira e juta, nas proporções 75:25, 50:50 e 25:75, respectivamente, empregando-se 10% de resina ureia-formaldeído, com prensagem a 2MPa e 160°C por 15 minutos e, em seguida, acondicionadas. As determinações de isolamento térmico e acústico foram realizadas em equipamentos projetados pela empresa NIRFAJT (Índia). Analisou-se por meio de um modelo não linear o efeito da espessura sobre a perda de som, notando-se que a absorção de som aumenta gradualmente com esta variável, estabilizando-se depois de certa espessura. Melhores resultados de isolamento térmico, resistência e inchamento foram obtidos para painéis de partículas do que para compensados, em especial aqueles produzidos com a juta em maior proporção, ressaltando-se sua menor densidade em relação aos demais insumos utilizados na produção dos painéis, o que pode trazer ganhos em relação ao isolamento térmico.

Mosiewicki et al. (2009) produziram compósitos de espuma PU à base de mamona reforçados com “farinha” de madeira de *Pinus*, em teores de 5, 10 e 15%, comparando-se com os mesmos compósitos com matriz de PU sintético. A produção caracterizou-se pela obtenção da espuma, por mistura manual de polioli, catalisador, agente espumante e surfactante e, em seguida, uma mistura de resina p-MDI e farinha de madeira foi adicionada à espuma e homogeneizada mecanicamente. O produto obtido foi classificado quanto à densidade, condutividade térmica (pelo método do fio quente), MEV (análise do preenchimento da espuma pela madeira), Termogravimetria (TG) e ensaio de compressão, conforme ASTM D1621. Os autores concluíram por meio das imagens de MEV que a madeira introduzida prejudicou a expansão da espuma, aumentando assim a rigidez do material e diminuindo as paredes celulares das espumas PU; entretanto a interação de ambos foi eficiente, devido à semelhança de grupos funcionais. A densidade dos produtos provenientes dos diferentes teores de madeira esteve semelhante para ambas as matrizes. Quanto à condutividade térmica os compósitos com matriz

de PU à base de mamona apresentaram desempenho superior (menor condutividade) que a matriz de PU sintética. Para compósitos com maior quantidade de madeira, a condutividade foi aumentada, o que afeta negativamente o isolamento. Compósitos com espumas PU com madeira apresentaram maior estabilidade térmica. A madeira diminuiu as propriedades de compressão mecânica das espumas, o que foi atribuído não à madeira em si, mas à fragilidade das paredes celulares à medida que se inseriu esta carga, prejudicando a expansão da matriz poliuretana durante o processo de fabricação.

Zhao et al. (2010) analisaram o efeito da incorporação dos resíduos de borracha de pneu em painéis aglomerados nas propriedades acústicas dos mesmos. Os autores produziram painéis com mistura de madeira e borracha nas proporções 60:40 e 50:50. Os painéis foram comparados com produtos comerciais, ou seja: painéis de aglomerado de madeira e pisos engenheirados de painéis aglomerados. Para a produção dos painéis, foram empregados resíduos da espécie *Larix gmelinii* e resíduos de pneu com granulometria entre 1 a 5 mm. As partículas foram incorporadas aos seus adesivos separadamente, sendo utilizado para a madeira 10% de ureia-formaldeído e 6% de PMDI para a borracha, e em seguida homogeneizados entre si. Foi realizada pré-prensagem dos painéis à pressão de 1,5 MPa e 30 segundos, enquanto a prensagem efetiva foi realizada a 4 MPa e 170°C por 5 minutos, obtendo-se painéis com dimensões de 300 mm x 300 mm x 12 mm e densidade 1000 kg/m³. A perda de transmissão de som ou isolamento acústico dos painéis foi mensurada em um equipamento, com medição de frequências de som de 250 a 1.600 Hz. Neste equipamento, o corpo de prova foi posicionado entre quatro microfones, sendo que um dos lados da amostra foi submetido à incidência normal da onda sonora e o outro lado transmitiu as ondas incidentes, obtendo-se as perdas de transmissão do som. Os autores obtiveram resultados condizentes com painéis comerciais, em particular nas composições com maior teor de borracha e consequentemente de PMDI, pois tanto este resíduo quanto o adesivo aplicado demonstraram boas propriedades de isolamento acústico. Além disso, houve uma boa interação entre os resíduos, na presença da ureia-formaldeído e do PMDI, fato observado por meio da análise da microestrutura, com a interface permanente entre madeira e borracha.

Macedo (2008) produziu compósitos de madeira e borracha proveniente de resíduos de recauchutagem de pneu em duas configurações. Na primeira configuração, foram produzidos painéis aglomerados de três camadas, com mistura de borracha e madeira de *Pinus taeda* na camada interna e apenas madeira nas superfícies, utilizando-se o adesivo fenol-formaldeído. Na segunda configuração, foram fabricados painéis de cimento-madeira e borracha, com uso

da mesma espécie e cimento Portland, além de diferentes proporções de borracha em relação à madeira. Os painéis de ambas as configurações foram caracterizados, respectivamente, conforme as normas ABNT NBR 14810-3 (2002) e ASTM D1037 (1998). Além disso, determinaram-se as propriedades acústicas e de colorimetria dos painéis aglomerados e naqueles contendo cimento-madeira-borracha analisou-se também o calor de hidratação do cimento. As propriedades físicas dos painéis de ambas as configurações aumentaram com a adição de borracha, ao passo que as características mecânicas tiveram um decréscimo com a inclusão deste insumo. Ambos os compósitos tiveram suas propriedades acústicas melhoradas com a inserção de borracha. Observou-se, no caso dos painéis com cimento, que a borracha pouco influenciou no processo de cura do cimento. Desta maneira, verificou-se a possibilidade de destinação dos compósitos para paredes divisórias e revestimentos de ambientes e forros.

Navroski et al. (2010) abordaram a avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas, utilizando-se três configurações de paredes: simples – com madeira de *Eucalyptus* sp.; composta - parede dupla de compensado e lâminas de Isopor® em seu interior e; parede dupla com casca de arroz em seu interior. As caixas foram perfuradas para a entrada do sensor do termômetro digital, vedando-se o orifício com silicone. Em seguida foram tampadas e colocadas em estufa com circulação de ar e temperatura de 40°C, confirmada por um termômetro ligado ao sensor presente no interior das caixas. Foram realizadas leituras a cada 5 minutos, durante um período de 120 minutos. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, as menores variações de temperatura no interior das caixas ocorreram na composição contendo compensado e Isopor®. Considerando-se a variação nos primeiros 30 minutos, as caixas preenchidas com casca de arroz e Isopor® apresentaram uma pequena diferença na variação de temperatura, de 1,4°C e 0,8°C, respectivamente, enquanto a caixa de parede simples de *Eucalyptus* sp apresentou variação de 10°C, enfatizando-se assim a eficiência das paredes compostas. Segundo os autores, apesar do resultado obtido, a madeira possui menor condutividade térmica (0,12 W.m-1.°C-1) que o tijolo (0,4 - 0,8W.m-1.°C-1), sendo um potencial substituto deste em paredes composta, principalmente utilizando-se o Isopor® (poliestireno expandido) e materiais alternativos como preenchimento.

Rauber (2011) abordou em seus estudos a produção de painéis aglomerados confeccionados com diferentes proporções de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e de resíduos granulares de poliuretano de uma indústria calçadista, utilizando-se um adesivo pré-polímero de poli-isocianato modificado base MDI. A inclusão dos

resíduos de PU proporcionaram melhores propriedades em relação à imersão em água, impacto IZOD, arrancamento de parafusos e adesão interna, demonstrando também uma interação satisfatória entre adesivo-madeira-grânulos de PU. Painéis com adição dos sólidos granulares proporcionaram menor condutividade térmica e consequentemente melhor desempenho para aplicações em isolamento térmico. Quanto à propriedade de isolamento acústico ao ruído aéreo, o painel com 60% de poliuretano apresentou melhor desempenho em relação à redução no nível sonoro, com maiores reduções nas faixas de frequência de 125, 250, 500, 2.000, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz. Além disso, verificou-se um aumento do nível sonoro na frequência de 250 Hz em todos os sistemas de divisória com os painéis aglomerados, demonstrando que essa é a frequência crítica dos painéis fabricados, ou seja, a menor frequência de coincidência, que pode ser afetada na medida em que se diminui a rigidez do material.

Karlinasari et al. (2012) produziram painéis acústicos de partículas de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* com duas diferentes densidades (0,5 e 0,8 g/cm³) e três tipos de tamanhos de partículas (finas, médias e “aparas” - grande). O desempenho dos painéis em relação à absorção sonora foi determinado em câmara reverberante, com medições padronizadas em bandas de um terço de oitavas, conforme método descrito pela JIS A 1405-1963 (1990). Os autores obtiveram valores satisfatórios do coeficiente de absorção principalmente para painéis de menor densidade, assim como para amostras produzidas com partículas finas e médias.

Hao; Zhao e Chen (2013) desenvolveram compósitos constituídos de fibras de *kenaf* e polipropileno, comparando seu desempenho com amostras de polipropileno virgem. Foram obtidas placas de 6 mm por moldagem à quente, com a adoção de diferentes parâmetros de prensagem como: pressão (0,5 MPa e 0,7 MPa), temperatura (200 °C e 230 °C) e tempo (60 s e 120 s) . Entre as propriedades abrangidas na caracterização dos compósitos, foram determinadas suas propriedades de estabilidade térmica, por meio de análise termogravimétrica (TGA) e absorção sonora em tubo de impedância. Os autores destacaram que maiores coeficientes de absorção sonora em frequências de 100 Hz a 6400 Hz foram obtidos para as amostras de ambas as pressões de prensagem 0,5 e 0,7 MPa, no entanto com menor temperatura e tempo de prensagem (200°C e 60s). Além disso, os compósitos de *kenaf* e polipropileno apresentaram-se mais estáveis termicamente do que o polipropileno virgem.

2.8 Considerações sobre a Revisão Bibliográfica

Por meio do exposto na Revisão Bibliográfica, verificaram-se questões a respeito dos insumos utilizados neste trabalho, como a madeira tratada e a borracha de pneu, além de materiais alternativos como o adesivo e espuma poliuretana, ambos à base de óleo de mamona. Foram abordados conceitos e questões a respeito dos materiais na forma de rejeitos, bem como seu uso potencial na produção dos compósitos particulados ou painéis de partículas.

Em termos de aplicação, foram abordados conceitos e pesquisas envolvendo as propriedades térmicas e a propriedade acústica de absorção sonora, fundamentando o emprego dos produtos obtidos na construção civil, setor que busca constantemente aliar desempenho à utilização de materiais com conceito de menor impacto ambiental.

Deste modo, fica evidente a contribuição científica do presente trabalho. O trabalho em questão buscou analisar a viabilidade do uso de rejeitos e insumos alternativos na produção de composições termoacústicas, por meio da fabricação e avaliação das propriedades físicas, mecânicas, térmicas, morfológicas e de absorção sonora de painéis particulados e espumas poliuretanas.

3 Materiais e Métodos

Nos itens deste capítulo, são apresentados os materiais, bem como a metodologia empregada na produção e caracterização dos painéis e espumas que constituem as composições termoacústicas.

3.1 Materiais

Para a produção dos painéis de partículas, foram consumidos 94,5 kg (0,135 m³) de *Pinus* sp. impregnados com CCB (preservante na base óxido composto de cromo, cobre e boro) com retenção de 7,5 kg/m³. Este insumo foi fornecido pela Prema Tecnologia e Comércio S/A, responsável pelo tratamento preservativo. A madeira, sob a forma de rejeitos de vigas, foi processada para obtenção das partículas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, onde foi realizada a pesquisa. Os rejeitos de madeira foram reduzidos em desgrossadeira, para obtenção de material semelhante aos resíduos geralmente encontrados em serrarias (Figura 11a). Posteriormente, foram geradas partículas passantes em peneira de 2,38 mm, no macro moinho de facas Marconi MA680 (Figura 11b).

A borracha de pneu inservível (Figura 11c) foi fornecida pela empresa EcoBalbo - Usina Recicladora de Pneus, licenciada pela CETESB, sendo empregados 60 kg de granulado de borracha, malha 5 mesh (aproximadamente 4 mm), normalmente utilizado em pisos sintéticos e mantas de borracha, para isolamento acústico. Adotou-se maior tamanho de grânulo de borracha do que das partículas de madeira justamente para promover uma maior porosidade nos painéis, característica citada anteriormente pela sua importância nas propriedades térmicas e de absorção acústica.

O adesivo empregado foi fornecido pela empresa Plural Indústria Química LTDA. Trata-se de resina do tipo bicomponente (Figura 11d), teor de sólidos de 100%, sendo o componente A um polioliol derivado do óleo vegetal (mamona), com densidade de 1,2 g/cm³, e o componente B o isocianato polifuncional, com densidade de 1,24 g/cm³. Este adesivo

possibilita cura a frio, podendo ser acelerada com temperatura a partir de 90°C (DIAS, 2008). Adotou-se a resina em questão devido ao seu aspecto ambiental e excelente desempenho em pesquisas anteriores, no âmbito de painéis, como Campos (2005), Dias (2008), Bertolini et al. (2013), Varanda et al. (2013), entre outros.

Figura 11– Materiais - produção dos painéis: (a) *Pinus* sp. tratado com CCB processado em desengrossadeira; (b) partículas de madeira; (c) grânulos de borracha de pneu; (d) adesivo PU bicomponente à base de mamona.

Como material de preenchimento das composições termoacústicas, foi proposta a utilização da espuma poliuretana à base de óleo de mamona, com formulação parcialmente derivada desta biomassa, assim como o adesivo utilizado nos painéis. Objetivando estabelecer um comparativo com a espuma PU à base de óleo de mamona, foi utilizada uma amostra comercial de espuma poliuretana rígida, 100% à base de petróleo. Além da diferenciação das espumas pelas suas origens, estas se distinguem quanto ao agente de expansão, sendo a água, na formulação da espuma PU de mamona, e um gás na formulação da espuma PU comercial. A formulação da espuma PU à base de óleo de mamona, também fornecida pela Plural Indústria Química LTDA, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Formulação da espuma poliuretana a base de óleo de mamona.

Descrição do Produto	Quantidade (%)
Poliol derivado de óleo vegetal	32,82
Poliól derivado de polissacarídeos	54,7
Silicone 1	1,75
Silicone 2	3,65
Catalisador 1	4,74
Catalisador 2	1,46
Catalisador 3	0,88
Total polioli	100
Isocianato	100

Em relação à espuma comercial, trata-se de um sistema 100% derivado do petróleo, que possui em sua formulação o formiato de metila, um agente de expansão sob forma de gás, ecologicamente correto, substituindo os chamados HCFCs.

A espuma comercial foi escolhida com base em uma publicação que menciona o uso de uma espuma poliuretana de formulação que também utiliza como agente expensor o formiato de metila, para compor um sistema construtivo de projetos financiados pelo Minha Casa, Minha Vida (POLIURETANO – TECNOLOGIA E APLICAÇÕES, 2012). Trata-se de um sistema modular composto de painéis com núcleo de uma espuma PU.

3.2 Estudos preliminares

Em estudo preliminar, composto de duas etapas, foram estudadas algumas condições de produção e configuração dos painéis, de modo a definir os fatores e metodologia para este trabalho. Os parâmetros envolvidos nas etapas do estudo preliminar apresentam-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros adotados nas etapas do estudo preliminar.

Etapa Preliminar	Amostra (configuração)	Adesivo (%)	D (g/cm ³)	Prensagem	
				Pressão (MPa)	T (°C)
1	Camada madeira+camada borracha (C)	12	0,6	2,5	100
	Mistura borracha (MB)				
	Camada central borracha (CB)				
2	Camada madeira+camada borracha (C)	15	0,6	4	120
	Mistura borracha (MB)				

A proporção de borracha de pneu adotada foi de 50% em relação ao peso de partículas de madeira, produzindo-se painéis com densidade nominal de 0,60 g/cm³ e dimensões 40 cm × 40 cm × 2 cm. As propriedades determinadas nestas etapas foram densidade, inchamento em espessura e absorção de água, MOR e MOE na flexão estática, e tração perpendicular às faces, conforme ABNT NBR 14810-3 (2006). Para investigar a influência dos parâmetros de produção de cada etapa e da configuração dos painéis foi utilizada a análise de variância (ANOVA), considerada ao nível de 5% de significância e teste de comparações múltiplas de Tukey.

Quanto às espumas poliuretanas, em estudo preliminar foi definida a metodologia para a expansão das formulações.

3.3 Produção dos Painéis de Partículas

Os tratamentos experimentais utilizados como base para fabricação dos painéis de partículas foram idealizados da combinação dos fatores: frações mássicas de partículas borracha [%Bor] - 50% e 75%; configuração das partículas de borracha nos painéis [Config] - camada (Cam) ou mistura (Mist); espessura dos painéis [Esp] - 10 mm e 20 mm; e pressão de prensagem [Press] - 2,5 MPa e 4 MPa, fornecendo 16 tratamentos [Tr] distintos e 4 tratamentos oriundos das condições de referência (sem adição de borracha), totalizando 20 tratamentos, como apresentado na Tabela 9. Foram produzidos 3 painéis de cada tratamento, totalizando 60 painéis, para suprirem a quantidade de corpos de prova para os ensaios de caracterização, conforme descrito no item 3.6.1 a seguir.

Tabela 9 – Tratamentos (Tr) obtidos pela combinação dos fatores na produção dos painéis.

Tr	Proporção dos insumos	Configuração	Pressão de Prensagem (MPa)	Espessura do painel (mm)
1	100% madeira	-	2,5	10
2			2,5	20
3			4	10
4			4	20
5	100% madeira/ 50% borracha	Camada (C)	2,5	10
6		Camada (C)	2,5	20
7		Camada (C)	4	10
8		Camada (C)	4	20
9		Mistura (MB)	2,5	10
10		Mistura (MB)	2,5	20
11		Mistura (MB)	4	10
12		Mistura (MB)	4	20
13	100% madeira/ 75% borracha	Camada (C)	2,5	10
14		Camada (C)	2,5	20
15		Camada (C)	4	10
16		Camada (C)	4	20
17		Mistura (MB)	2,5	10
18		Mistura (MB)	2,5	20
19		Mistura (MB)	4	10
20		Mistura (MB)	4	20

As variações na produção dos painéis foram embasadas em estudos preliminares, além de pesquisas na literatura das características influentes nas propriedades de condicionamento acústico e térmicas dos materiais. A adição de borracha em relação à madeira foi baseada na quantidade de madeira utilizada nos painéis testemunha (100% madeira). Sendo assim, painéis 100%madeira/50% borracha e 100% madeira/75% correspondem à relação em peso dos insumos madeira:borracha de, aproximadamente, 70:30 e 60:40.

Estabeleceram-se densidades nominais de 0,56 g/cm³, 0,81 g/cm³ e 0,94g/cm³, para os painéis contendo, respectivamente, 100% madeira (amostras testemunhas), 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha. Esta densidade nominal baseia-se na quantidade de material introduzido no volume do painel. A densidade caracteriza-se como um fator determinante nas propriedades dos painéis, desde seu desempenho físico-mecânico, propriedade fonoabsorvente e também na condutividade térmica.

A Figura 12 apresenta a metodologia adotada para a produção dos painéis: 1. Obtenção das partículas de madeira - em desgrossadeira e moinho macro de facas; 2. Homogeneização em encoladeira (partículas de madeira e/ou borracha + resina); 3. Formação do colchão (pré-prensagem); 4. Prensagem a quente; 5. Acondicionamento e ajuste das dimensões finais dos painéis.

Com base em estudos preliminares, foram adotados para a produção dos painéis teores de adesivo de 12% (em relação ao peso das partículas) para o constituinte “madeira” e 3% de adesivo para o constituinte “borracha”, considerando-se em ambos os casos uma proporção de poliol e pré-polímero de 1:1, conforme estudos anteriores de Bertolini (2011). Os painéis foram consolidados por prensagem à quente durante 10 minutos, à temperatura de 100°C. As dimensões finais dos painéis após prensagem foram de 40 cm × 40 cm. A Figura 13 apresenta os painéis produzidos e suas diferentes configurações.

Figura 12 – Etapas de produção dos painéis de partículas.

Figura 13 – Painéis de Partículas: (a) amostras testemunhas (100% madeira); (b) amostras com adição de borracha misturada à madeira (MB) e; (c) amostras contendo madeira e borracha em camadas (C).

3.4 Produção das Espumas Poliuretanas

O procedimento para produção (expansão) das espumas poliuretanas, consolidado em estudo preliminar, foi semelhante tanto para a amostra derivada da mamona, quanto para a espuma comercial. Considerando-se as características do processo de produção das espumas poliuretanas, devido à liberação de calor (processo exotérmico) durante a expansão, necessitou-se do desenvolvimento de um molde e equipamento. Adaptou-se a pré-prensa utilizada na produção dos painéis para este fim. O molde foi fabricado em madeira maciça, com dimensões de 40 cm × 40 cm × 5 cm, sendo revestido por filme plástico, com tampa de madeira revestida pelo mesmo material, para evitar a aderência da espuma no molde. Durante a produção das espumas, a pré-prensa teve a função de aplicar uma baixa pressão (0,1 MPa), controlando assim a expansão.

A quantidade dos componentes da formulação de espuma PU para sua produção foi de 640 g, estipulando-se o necessário para preenchimento do molde. Considerou-se na massa total da formulação um adicional em peso de 25%, representando possíveis perdas durante a fabricação (massa retida nos recipientes, misturador e molde). Foi utilizada a proporção de polioli e pré-polímero de 1:1 para as espumas derivada da mamona e espuma comercial, conforme sugestão do fornecedor.

Na fabricação das espumas, os componentes foram pesados e homogeneizados com auxílio de um misturador próprio para tintas, acoplado em furadeira, transferindo a mistura

rapidamente para o molde. Em seguida, o molde foi fechado, aplicando-se pressão para conter a expansão da espuma poliuretana. Decorridos 10 minutos para se processarem as reações de expansão e cura, as amostras foram desmoldadas e armazenadas durante 2 dias para resfriamento e consolidação total. A Figura 14 apresenta o procedimento de fabricação das espumas. Apesar de controlada, durante a expansão das espumas a massa se sobressaiu do molde. Para ajuste das dimensões finais, as amostras foram esquadrejadas em relação a todos os seus lados, resultando em blocos de 39,5 cm x 39,5 cm x 5 cm (Figura 15).

Figura 14 – Procedimento utilizado para a expansão das espumas PU à base de mamona: (a) e (b) pesagem dos componentes da espuma; (c) misturador; (d) molde; (e) e (f) expansão da espuma e; (g) espuma poliuretana expandida.

Figura 15 – Espumas poliuretanas: a) espuma comercial; b) espuma poliuretana a base de óleo de mamona.

3.5 Caracterização das partículas de madeira e de borracha

3.5.1 Análise granulométrica

Para a classificação das partículas quanto à distribuição granulométrica foi utilizado um agitador eletromecânico de peneiras da marca SOLOTEST (Figura 16), do Laboratório de Geotecnia Ambiental, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. As peneiras utilizadas no ensaio possuem abertura em *mesh* de acordo com a especificação da ASTM, sendo estas correspondentes a 4, 5, 7, 10, 16, 30 e 40 *mesh*. As amostras para a classificação granulométrica foram referentes às partículas de madeira e os grânulos de borracha nas dimensões utilizadas para fabricação dos painéis, conforme item 3.1. As condições de ensaio foram baseadas em estudos de Vianna, Correa e Razzino (2004) e Bertolini et al. (2013), sendo: massa da amostra - 200 gramas, tempo de vibração - 10 minutos, frequência de vibração - 9 Hz, número de repetições - 3. Neste ensaio, o material atravessa as peneiras em ordem decrescente de abertura (considerando-se a

dimensão em milímetros). As partículas passantes na peneira de 40 *mesh*, restante na base do conjunto de peneiras foram denominadas como “finos”.

Figura 16 - Equipamento Solotest – Classificação das partículas de madeira e borracha.

3.5.2 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade das partículas foi conduzida em termobalança semi-analítica i-THERMO 163L Bel Engineering, com resolução de 0,001g (Figura 17). As análises foram feitas em triplicata, sendo a massa da amostra de 1 grama, submetida a 105°C. O ensaio foi conduzido no Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. Foram selecionadas amostras de partículas de madeira e de borracha de pneu para o ensaio. No entanto, devido à baixa umidade da borracha registrada durante o ensaio (< que 1%) e à sua capacidade de dilatação com a temperatura, a determinação da umidade na termobalança não foi possível. Cheung; Jansen e Hanson (2008) em caracterização das propriedades de resíduos de borracha de pneu observaram muito pouca umidade, assumindo valor igual a zero.

Figura 17 - Termobalança para determinação do teor de umidade das partículas.

3.6 Caracterização dos painéis de partículas e espumas poliuretanas

Os tópicos a seguir apresentam a obtenção dos corpos de prova e metodologia dos ensaios realizados, para determinação das propriedades dos painéis e espumas que constituem as composições termoacústicas.

3.6.1 Obtenção dos corpos de prova e descrição dos ensaios

Para realização dos ensaios, foram obtidos corpos de prova dos 60 painéis produzidos, sendo 3 painéis de cada tratamento, conforme mostra a Tabela 10. A Figura 18 mostra um esquema representando o corte do painel para obtenção dos corpos de prova. Destaca-se que para o ensaio de absorção sonora os painéis foram utilizados inteiros.

Tabela 10 – Corpos de prova para os ensaios de caracterização.

Ensaio		Quantidade de painéis	CP/painel	Total CP
Densidade	D	3	2	6
Teor de umidade	TU	3	2	6
Inchamento em espessura – 2 e 24 horas	IE	3	2	6
Absorção de água – 2 e 24 horas	AA	3	2	6
Módulo de ruptura/ Módulo de elasticidade	MOR/ MOE	3	2	6
Tração perpendicular	RTP	3	2	6
Arrancamento de parafuso – topo e superfície	AP _T e AP _s	3	2	6
Determinação da Absorção Sonora	AS	3	-	-
Condutividade térmica	CT	1	1	1
Análise Termogravimétrica	TGA	1	1	2
Microscopia Eletrônica de Varredura	MEV	2	4	8
Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	PIM	2	4	8

Figura 18 – Esquema de corte dos painéis para obtenção dos corpos de prova (dimensões em mm).

Para as espumas poliuretanas, foi utilizada quantidade de corpos de prova semelhante aos painéis, no que diz respeito aos ensaios realizados em comum, exceto para a densidade aparente.

Foram abordados para a caracterização os ensaios apresentados na Tabela 11. A execução destes ensaios foi baseada nas dimensões exigidas para os corpos de prova, sendo inicialmente realizados os testes nos quais os painéis/espumas eram utilizados inteiros e, posteriormente, retirados os corpos de prova para as demais determinações.

Tabela 11 – Ensaio para caracterização das composições termoacústicas.

Ordem de Execução	Caracterização das Composições Termoacústicas	
	Painéis de Partículas	Espumas Poliuretanas
1	Acústica	
	Determinação da Absorção Sonora	
2	Isolamento Térmico	
	Determinação da Condutividade Térmica	
3	Degradação Térmica	
	Análise Termogravimétrica - TGA;	
4	Caracterização Morfológica	Caracterização Morfológica
	Microscopia Eletrônica de Varredura;	Microscopia Eletrônica de Varredura
	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	
5	Caracterização ABNT NBR 14810-3 (2006)	Caracterização Física
	Propriedades físicas	
	- Densidade	
	- Teor de umidade	
	- Inchamento em espessura – 2 e 24 horas	
	- Absorção de água – 2 e 24 horas	
	Propriedades Mecânicas	
	- Flexão estática: MOR e MOE	
	- Tração perpendicular	
	- Arrancamento de parafuso – topo e superfície	

3.6.2 Estabilidade térmica - Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) teve como objetivo avaliar a degradação térmica dos painéis e espumas poliuretanas. Segundo Cardoso (2010), o estudo das etapas de decomposição possibilita determinar a faixa de temperatura útil do material.

As amostras selecionadas foram: painel – região de madeira (Pmad); Paineis – região de borracha (Pbo); espuma PU derivada do óleo de mamona (Emam); espuma PU comercial (Ecom). Para realização do ensaio o material foi moído em moinho micro de facas Marconi MA048, até a obtenção de um pó fino.

As curvas TG foram obtidas utilizando-se um equipamento TGA-50 da Schimadzu (Figura 19), o qual foi calibrado na razão de aquecimento de 10 °C/min, com oxalato de cálcio de alta pureza. Foram usadas massas de amostra de 5 mg, pesadas com precisão de $\pm 0,1$ mg, e acondicionadas em suporte de amostra de platina. A atmosfera do forno foi saturada com ar sintético (20% de oxigênio + 80% nitrogênio), super puro (99,999%), a uma vazão de 100 mL/min. O intervalo de temperatura de análise foi da temperatura ambiente até 800 °C. As condições de ensaio foram adaptadas de estudos de Rodrigues (2008), abordando a análise de compósitos de borracha com resina PU de mamona.

Figura 19 – Equipamento TGA-50 Schimadzu para análise termogravimétrica.

3.6.3 Caracterização morfológica

Os tópicos a seguir apresentam a metodologia da caracterização morfológica por meio das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para os painéis e espumas, além da determinação de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) dos painéis de partículas. Os painéis de partículas caracterizam-se como compósitos de madeira, em alguns casos com adição de borracha de pneu, sendo essencial a análise da interface entre as fases (madeira, borracha e adesivo), distribuição destas fases, vazios internos e porosidade, ou seja, características que podem ser associadas às outras propriedades e comportamento destes produtos. A análise por MEV das espumas poliuretanas permite visualizar sua estrutura formada por células que podem ser abertas ou fechadas, sendo possivelmente influente nas suas propriedades térmicas e acústicas.

3.6.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – painéis e espumas

Para obtenção das amostras de painéis para o ensaio de MEV, foram preparados corpos de prova de flexão, apenas para submetê-los à ruptura e retirada das amostras da superfície fraturada, facilitando a aquisição das imagens. Objetivando analisar principalmente as características de interação entre partículas de madeira, grânulos de borracha e adesivo e distribuição destes componentes, retiraram-se 8 amostras conforme a Tabela 12. A Figura 20 apresenta os corpos de prova para a análise por MEV.

Tabela 12 – Amostras de painéis para ensaio de MEV.

Amostra	Sigla	Característica da Amostra
1	M(4)	região do painel - parte madeira (4MPa)
2	C(4)	região do painel da interface entre camadas (4 MPa)
3	B(4)	região do painel - parte borracha (4 MPa)
4	MB(4)	painel com mistura de borracha (4 MPa)
5	M(2,5)	região do painel - parte madeira (2,5MPa)
6	C(2,5)	região do painel da interface entre camadas (2,5 MPa)
7	B(2,5)	região do painel - parte borracha (2,5 MPa)
8	MB(2,5)	painel com mistura de borracha (2,5 MPa)

Figura 20 – Corpos de prova no porta-amostra para análises por MEV.

A obtenção de imagens neste ensaio se dá por diferentes sinais produzidos pela interação de elétrons com a amostra (GONÇALVES, 2004). As amostras preparadas com dimensões de 1,0 x 1,0 cm foram secas em estufa com circulação de ar, marca Marconi modelo MA 035, à 50°C por 24 horas, anteriormente ao ensaio e mantidas em dessecador. As amostras foram recobertas com 20nm de ouro em um metalizador Coating System BAL-TEC MED 020. As fotomicrografias de MEV foram obtidas no Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, em um equipamento LEO (modelo 440) com detector OXFORD, operando com feixe de elétrons de 20kV (Figura 21).

Figura 21 – Da esquerda para a direita: amostras recobertas em ouro; introdução das amostras no detector do MEV e equipamentos para o ensaio de MEV.

Para as análises de MEV, as espumas poliuretana comercial e poliuretana à base de óleo de mamona, nomeadas de COM e MAM, foram preparadas semelhantemente às amostras de painéis.

3.6.3.2 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio - painéis

O ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) é considerado uma das técnicas mais importantes na determinação de porosidade de materiais, pois fornece características como densidade aparente, distribuição do número de poros, volume total de poros e área específica do material (BERTOLINI, 2011).

Neste trabalho, a determinação da porosidade teve o objetivo de avaliar a influência da pressão de prensagem nesta propriedade dos painéis de partículas de madeira e/ou borracha, sendo importante sua associação com as propriedades termoacústicas investigadas. Para as propriedades térmicas e acústicas, a estrutura do material é bastante relevante; no caso da absorção sonora, a porosidade dos materiais promove a passagem de fluxo de ar para que as ondas sonoras penetrem nos poros ou nos interstícios das fibras, dissipando a energia sonora incidente por atrito em energia térmica (OLIVEIRA, 2009).

Para as análises de PIM, foram selecionados 8 corpos de prova com as mesmas características das amostras utilizadas para a MEV (Tabela 12), ou seja, M(4), C(4), B(4), MB(4), M(2,5), C(2,5), B(2,5) e MB(2,5) .

As condições de ensaio foram baseadas em análises de painéis de partículas, abordadas por Bertolini (2011) e Varanda (2012). Os corpos de prova possuíam dimensões de 14 mm x 14 mm x 23 mm, passando por secagem em estufa com circulação de ar a 50°C por 24 horas até o início do ensaio, para retirada da umidade das mesmas, o que poderia influenciar nos resultados do ensaio. As análises desta propriedade foram conduzidas no equipamento Micromeritics Poresizer 9320, com capacidade de pressão de 200 MPa. Os parâmetros do processo foram: mercúrio com tensão superficial de 0,485 g/cm² e densidade entre 13,5325 e 13,5379 g/mL; ângulo de contato do avanço e retrocesso de 130° e tempo de equilíbrio entre a baixa e alta pressão de 10 s. A Figura 22 ilustra as amostras e equipamento utilizado no ensaio de porosimetria.

Figura 22 – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio: (a) amostras; (b) corpo de prova na cápsula de ensaio; (c) equipamento Micromeritics Poresizer 9320.

3.6.4 Densidade aparente – espumas poliuretanas

A densidade aparente das espumas poliuretanas foi determinada de acordo com a norma ASTM D1622 (2003) “*Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics*”. A metodologia é baseada na relação entre a massa determinada e o volume, obtidas com uma balança analítica (0,01g) e paquímetro digital. Foram retirados 5 corpos de prova de cada amostra de espuma poliuretana, com dimensões de 3,0 cm × 3,0 × cm 3,0 cm.

3.6.5 Propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram obtidas conforme as recomendações da norma ABNT NBR 14810 (2006) “*Chapas de madeira aglomerada*”. Os valores obtidos para as propriedades dos painéis foram comparados com os principais documentos normativos adotados para painéis de partículas: norma americana ANSI A 208.1 (1999) “*Particleboard*”; norma canadense CS 236 (1966) “*Mat formed wood particleboard*” e europeia EN 312 (2003) “*Particleboards – Specifications*”.

As propriedades físicas determinadas foram densidade, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água em 2 e 24 horas. Em relação às propriedades mecânicas,

determinou-se o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática, resistência à tração perpendicular às faces e resistência ao arrancamento de parafusos – topo e superfície. A metodologia para realização dos ensaios físicos e mecânicos é detalhada a seguir.

3.6.5.1 Teor de umidade e Densidade

Na obtenção do teor de umidade, os corpos de prova de dimensões 50 mm × 50 mm foram inicialmente pesados em balança analítica com precisão de 0,01g. Em seguida, foram colocados em estufa Marconi MA035, com circulação de ar, a 105±3°C, e pesados a cada 1 hora, até atingir massa constante, obtendo-se o peso seco. O teor de umidade foi determinado conforme Equação 3.

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (3)$$

Onde: U é a umidade residual (%); MU é a massa úmida (g); MS é a massa seca (g).

Para a determinação da densidade dos painéis, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 50 mm × 50 mm. A densidade foi obtida por meio da relação massa/volume. Os espécimes foram aferidos com auxílio de paquímetro digital Mitutoyo (0,01 mm) e pesados em balança analítica (0,01g).

3.6.5.2 Inchamento em espessura e Absorção de água

Para a análise das propriedades de inchamento em espessura e absorção de água, após imersão em água, foram obtidos corpos de prova com dimensões de 25 mm × 25 mm. As amostras foram medidas em relação à sua espessura e pesadas, com auxílio de paquímetro

digital Mitutoyo (0,01 mm) e balança analítica (0,01g), antes e após imersão em água, por períodos de 2 e 24 horas (Figura 23).

Figura 23 – Inchamento em espessura e absorção de água: imersão, medidas de espessura e pesagem dos corpos de prova.

Os valores do inchamento em espessura e absorção de água, em 2 e 24 horas de imersão em água, foram obtidos conforme as Equações 4 e 5.

$$IE = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100 \quad (4)$$

Onde: IE é o inchamento em espessura (%); $E1$ é a espessura do corpo de prova após imersão (mm); $E0$ é a espessura do corpo de prova anteriormente à imersão (mm).

$$AA = \frac{M1 - M0}{M0} \times 100 \quad (5)$$

Onde: A é a absorção de água (%); $M1$ é a massa do corpo de prova após imersão (g); $M0$ é a massa do corpo de prova anteriormente à imersão (g).

3.6.5.3 Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE)

O ensaio de flexão estática foi conduzido em uma Máquina Universal de Ensaio AMSLER, com capacidade de 250 KN (Figura 24).

Figura 24 – Ensaio de flexão estática: determinação do MOR e MOE.

Os corpos de prova de 50 mm × 250 mm foram aferidos quanto as suas dimensões de espessura e largura em três pontos, tomando a dimensão como o valor médio. Em seguida, foram ensaiados para determinação do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE), conforme as Equações 6 e 7.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times E^2} \quad (6)$$

Onde: *MOR* é o módulo de ruptura (MPa), *P* é a carga de ruptura (N); *D* é a distância entre apoios (mm); *B* é a largura do corpo de prova (mm); *E* é a espessura do corpo de prova (mm).

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (7)$$

Onde: *MOE* é o módulo de elasticidade (MPa), *P1* é a carga no limite proporcional (N); *D* é a distância entre apoios (mm); *d* é a deflexão correspondente a *P1* (mm); *B* é a largura do corpo de prova (mm); *E* é a espessura do corpo de prova (mm).

3.6.5.4 Tração Perpendicular às faces

O ensaio de tração perpendicular às faces, também conhecido como adesão interna, tem como objetivo avaliar a resistência da ligação entre os constituintes do painel (partículas e adesivo). Os corpos de prova de 50 mm × 50 mm foram medidos com paquímetro, para obtenção da área, e colados em blocos metálicos com adesivo bicomponente Araldite® (Figura 25a), para fixação no dispositivo da máquina. O ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio AMSLER, capacidade de 250 KN, conforme Figura 25b.

Figura 25 – Tração perpendicular às faces: a) corpo de prova; b) ensaio.

A resistência à tração perpendicular foi calculada conforme a Equação 8.

$$RTP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Onde: RTP é a resistência à tração perpendicular (MPa); P é a carga de ruptura (N); S é a área do corpo de prova (mm²).

3.6.5.5 Arrancamento de parafuso – topo e superfície

Para a análise da resistência ao arrancamento de parafuso, foram obtidos corpos de prova de dimensões de 115 mm × 65 mm para ensaio em relação ao topo e de 150 mm × 75 mm para a superfície. O ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio AMSLER, com capacidade de 250 kN (Figura 26). O valor de resistência refere-se à leitura, em Newton (N), obtida no indicador de cargas da máquina, uma vez que aplicada velocidade, especificada pela norma, até retirada do parafuso.

Figura 26 – Ensaio de arrancamento de parafuso: a) em relação ao topo; b) em relação à superfície.

3.6.5.6 Análise estatística

Para investigação da influência dos fatores adição de borracha [%Bor], configuração da borracha nos painéis [Config], espessura dos painéis [Esp] e pressão de prensagem [Press]) e de suas interações nas propriedades físicas e mecânicas, três planejamentos fatoriais completos foram delineados.

O 1º Planejamento Experimental objetivou investigar a potencialidade dos painéis fabricados com adição de borracha misturada às partículas de madeira (MB), em relação aos painéis contendo somente madeira (Tabela 13).

Tabela 13 – Primeiro planejamento fatorial: painéis com mistura de borracha *versus* painéis contendo apenas madeira.

Tr	[%Bor]	[Config]	[Esp]	[Press]
9	50	Mistura	10	2,5
11	50	Mistura	10	4
10	50	Mistura	20	2,5
12	50	Mistura	20	4
17	75	Mistura	10	2,5
19	75	Mistura	10	4
18	75	Mistura	20	2,5
20	75	Mistura	20	4
1	0		10	2,5
3	0	-	10	4
2	0	-	20	2,5
4	0	-	20	4

O 2º Planejamento Experimental consistiu na avaliação da influência das partículas de borracha dispostas em camada (C), em relação aos painéis contendo somente madeira (Tabela 14).

Tabela 14 - Segundo planejamento fatorial: painéis com borracha em camada *versus* painéis de madeira.

Tr	[%Bor]	[Config]	[Esp]	[Press]
5	50	Camada	10	2,5
7	50	Camada	10	4
6	50	Camada	20	2,5
8	50	Camada	20	4
13	75	Camada	10	2,5
15	75	Camada	10	4
14	75	Camada	20	2,5
16	75	Camada	20	4
1	0	-	10	2,5
3	0	-	10	4
2	0	-	20	2,5
4	0	-	20	4

O 3º Planejamento Experimental possibilitou a comparação das duas configurações de disposição das partículas de borracha – camada (C) e mistura (MB) (Tabela 15).

Tabela 15 - Terceiro planejamento fatorial: comparativo entre as duas configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Tr	[%Bor]	[Config]	[Esp]	[Press]
5	50	Camada	10	2.5
7	50	Camada	10	4
6	50	Camada	20	2.5
8	50	Camada	20	4
9	50	Mistura	10	2.5
11	50	Mistura	10	4
10	50	Mistura	20	2.5
12	50	Mistura	20	4
13	75	Camada	10	2.5
15	75	Camada	10	4
14	75	Camada	20	2.5
16	75	Camada	20	4
17	75	Mistura	10	2.5
19	75	Mistura	10	4
18	75	Mistura	20	2.5
20	75	Mistura	20	4

Para investigar a influência dos fatores e suas interações nas propriedades físicas e mecânicas em cada planejamento foi utilizada a análise de variância (ANOVA), considerada ao nível de 5% de significância (α), tendo como hipótese nula (H_0) a equivalência de médias entre os tratamentos e a não equivalência das médias como hipótese alternativa (H_1). P-valor inferior ao nível de significância implica em rejeitar H_0 , aceitando-a em caso contrário.

Para validação da ANOVA, foi avaliada a normalidade nas distribuições dos resíduos por variável resposta (Teste de Anderson-Darling), a homogeneidade dos resíduos dos tratamentos (Teste de Bartlett e de Levene) e a independência dos resíduos (gráfico de resíduos *versus* ordem de observação). O teste de Anderson-Darling teve a normalidade dos resíduos como hipótese nula e a não normalidade como hipótese

alternativa. P-valor superior ao nível de significância (5%) implica aceitar H_0 , rejeitando-a em caso contrário.

Os testes de Bartlett e de Levene tiveram a equivalência das variâncias dos resíduos entre os tratamentos como hipótese nula e a não equivalência como hipótese alternativa. P-valor superior ao nível de significância (5%) implica aceitar H_0 , refutando-a em caso contrário.

Considerado significativo o fator ou a interação de fatores em alguma das propriedades investigadas, na sequência foi utilizado o teste de comparações múltiplas de Tukey, para o agrupamento dos níveis dos fatores e para auxiliar na interpretação dos efeitos das interações. Gráficos de interações entre fatores também foram utilizados.

As análises estatísticas das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de partículas foram realizadas com auxílio do software Minitab 16®.

3.6.6 Determinação das propriedades para o isolamento térmico

A metodologia para determinação das propriedades de condutividade térmica, resistência térmica, resistência térmica total e transmitância térmica, dos painéis de partículas e espumas poliuretanas, é apresentada nos tópicos a seguir.

3.6.6.1 Ensaio de Condutividade Térmica

O ensaio para a determinação da propriedade de condutividade térmica foi realizado no Laboratório de Propriedades Térmicas, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

O método da coluna fracionada modificado utilizado é descrito por Santos W. N. (2011). Este método consiste em uma cavidade composta internamente de manta cerâmica e tijolos isolantes, sendo a estrutura lateral externa de aço inoxidável (Figura 27). O fundo da caixa é uma placa de carbetto de silício, que é aquecida por um forno de temperatura controlada e variável até 500 °C. As placas de material padrão são produzidas em alumina A-1000, prensada e queimada. Neste método de ensaio, considerando-se a ausência de perdas de

calor lateral a condutividade é calculada pela equação de Fourier, Equação 9 (INCROPERA E DEWITT, 1996). Uma vez que o estado estacionário é atingido, as temperaturas são registradas pelos termopares 1, 2 e 3 e a condutividade térmica é calculada pela Equação 10.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Onde: q é o fluxo de calor que atravessa a área A ; $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura através da superfície A ; k é a condutividade térmica do material.

$$k_{amostra} = \frac{k_{padrão} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{padrão}}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{amostra}} \quad (10)$$

Onde: $k_{amostra}$ e $k_{padrão}$ são os valores de condutividade térmica da amostra e do padrão.

Figura 27 – Esquema do arranjo dos corpos de prova no método da coluna fracionada modificada.

Fonte: Santos, W. N. (2011).

Para realização do ensaio foram obtidos corpos de prova retangulares de dimensões de 11,4 cm × 20 cm. A determinação da condutividade térmica foi realizada para as 20 amostras de painéis de partículas (tratamentos 1 ao 20), as duas amostras de espumas poliuretanas (Figura 28) e amostra da região de borracha de um painel em camada, sendo este último a título de comparação com a condutividade térmica dos painéis contendo apenas madeira.

Figura 28 – Corpos de prova para ensaio de condutividade térmica: a) espuma poliuretana derivada da mamona; b) espuma poliuretana comercial; c) painel com mistura de borracha; c) painel com borracha em camada.

O equipamento utilizado no ensaio de condutividade térmica é apresentado na Figura 29. O sistema de aquisição e processamento de dados utilizado é automatizado. O transiente de temperatura detectado pelos termopares é processado em um computador, por meio de um conversor analógico-digital, usando um programa computacional desenvolvido para este fim. O corpo de prova foi posicionado na coluna do equipamento conforme esquema descrito anteriormente, entre os termopares e o material padrão (Figuras 29b, 29c e 29d). Em seguida, foram inseridos no *software* os dados para realização do ensaio: espessura (m) e condutividade térmica (W/m.K) de um material de referência (polímero com propriedades conhecidas), espessura do corpo de prova (m), tempo de estabilização do sistema (min), intervalo de leituras (min) e tempo para realização das leituras (min).

As determinações da condutividade térmica foram conduzidas na temperatura de 60°C, simulando exposição do material à temperatura ambiente, considerando-se que, a temperatura registrada na amostra (Termopares 2 e 3) é inferior à temperatura de ajuste. A taxa de aquecimento foi de 1°C/min. O ciclo de ensaio para cada amostra foi de 15 horas,

sendo 420 minutos de estabilização do sistema para atingir um estado estacionário de condução de calor, em seguida, leituras a cada 1 minuto por 480 minutos. A condutividade térmica de cada tratamento foi obtida como um valor médio das 480 leituras registradas. A quantidade de leituras foi definida em estudo preliminar, devido ao gradiente de temperatura na amostra.

Figura 29 – a) Equipamento para determinação da condutividade térmica; b), c) e d) posicionamento do corpo de prova na coluna - termopares entre padrão e amostra e fechamento da coluna com o padrão.

O ensaio pelo método da coluna fracionada modificada forneceu valores de: temperatura na base do padrão (placa de alumina) e temperaturas da base e do topo do corpo de prova ($^{\circ}\text{C}$) obtidas pelos termopares, temperatura média do corpo de prova (K) e fluxo de calor (W/m^{-2}). Estas informações foram utilizadas pelo software, determinando-se a condutividade térmica (W/m.K).

3.6.6.2 Resistência térmica, resistência térmica total e transmitância térmica

Com base nos valores de condutividade térmica obtidos para painéis e espumas poliuretanas, determinou-se de acordo com a ABNT NBR 15220 (2003), a propriedade de resistência térmica (Equação 11). Determinou-se também a resistência térmica de superfície a superfície e a resistência térmica total (Equações 12 e 13) de composições termoacústicas, baseadas nos painéis/espumas de menor condutividade térmica. Os componentes (painel e espuma) foram considerados como camadas homogêneas.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (11)$$

Onde: R é a resistência térmica $[(m^2.K)/W]$; e refere-se à espessura (m); λ é a condutividade térmica do material $(W/m.K)$.

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_m + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{an} \quad (12)$$

Onde: R_{t1} , R_{t2} , ..., R_m são as resistências térmicas das n camadas homogêneas, determinadas pela expressão da resistência térmica; R_{ar1} , R_{ar2} , ..., R_{an} são as resistências térmicas das n câmaras de ar, obtidas pela ABNT NBR 15220 (2003) $[(m^2.K)/W]$.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (13)$$

Onde: R_T é a resistência térmica total, R_t é a resistência térmica de superfície a superfície; R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas da ABNT NBR 15220 (2003) $[(m^2.K)/W]$.

A transmitância térmica, conhecida como a propriedade que se refere à quantidade de radiação que atravessa um material em relação à radiação incidente, caracteriza-se como o inverso da resistência térmica total (ABNT NBR 15220-1: 2003), conforme a Equação 14.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (14)$$

Onde: U é a transmitância térmica ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$); R_T é a resistência térmica total [$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$].

3.6.7 Determinação da propriedade acústica de absorção sonora

O ensaio de absorção sonora dos painéis e espumas foi realizado no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF), pertencente ao Departamento de Arquitetura e Construção - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

A determinação dos coeficientes de absorção sonora foi realizada em câmara reverberante de escala 1:5, construída com relações entre suas dimensões, material para sua construção e instalação de difusores, conforme indicado na norma de ensaio de potência sonora ISO 3741 (1999) (SANTOS, C., 2011).

A câmara possui formato de paralelepípedo com dimensões de 1,20 m de largura, 1,52 m de profundidade e 0,96 m de altura, ou seja, volume de $1,75\text{m}^3$, com área máxima para o posicionamento das amostras no interior da câmara de $0,48\text{m}^2$. As frequências de medição também estão conforme o fator de escala, ou seja, para as medições realizadas na câmara escala 1:5 na faixa de frequência de 500 Hz a 16000 Hz, considera-se a faixa de 100 Hz a 3200 Hz, valores estes compreendidos nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitavas determinadas pela ISO 354 (1985).

Para reprodução dos sinais em escala, utilizou-se uma fonte sonora omnidirecional em escala 1:5 em formato de dodecaedro, com transdutores capazes de reproduzir sons em altas frequências (4 kHz a 30 kHz) e uma pequena caixa acústica acoplada representando um reproduzidor de baixas frequências (< 4 kHz, em escala $< 800\text{Hz}$). Para separar as frequências dos reproduzidores e realizar a pré-ênfase do sinal, de modo que os níveis fossem equivalentes em amplitude para todas as frequências foi utilizado um equalizador. A captação dos sinais foi realizada utilizando-se o microfone modelo 40 BE da G.R.A.S. de ¼ de polegada pré-polarizado, com resposta em frequência plana de 100 a 40 kHz. Para

ajuste do campo difuso da câmara de acordo com o material analisado, foram inseridos 4 difusores metálicos, seguindo-se método de colocação descrito na norma ISO 354 (1985).

A Figura 30 apresenta os itens do sistema que constitui o ensaio de absorção sonora, descritos anteriormente.

Figura 30 – Ensaio de Absorção Sonora: (a) câmara reverberante em escala 1:5 com difusores em destaque; (b) fonte sonora omnidirecional em escala 1:5; (c) microfone - captação dos sinais e; (d) equalizador.

Segundo procedimento detalhado por Santos e Bertoli (2009), os ensaios em escala são realizados considerando-se as correções necessárias de temperatura e umidade medidas no momento do ensaio, de forma que representem os resultados obtidos em escala real, conforme especificado pela ISO 354 (1985). A reprodutibilidade da câmara reverberante em escala de 1:5 foi avaliada em medições acústicas de tijolos por Santos e Bertoli (2009). Os tijolos foram ensaiados em câmara reverberante em escala real e na câmara reverberante em escala reduzida, estabelecendo-se um comparativo dos coeficientes de absorção sonora (Figura 31).

Figura 31 – Comparativo de determinações da absorção sonora em câmara reverberante de escala real em relação à câmara reverberante em escala de 1:5. Fonte: Santos e Bertoli (2009).

Para determinação do coeficiente de absorção, foram realizadas medições de Tempo de Reverberação, com auxílio do software de avaliação acústica de salas DIRAC da Brüel & Kjaer, sendo possível a obtenção da resposta impulsiva de um ambiente usando diferentes tipos de sinais de excitação (SANTOS, C., 2011). Para cada amostra foram realizadas as medições do tempo de reverberação em 5 diferentes posições de microfones e 1 posição de fonte sonora, perfazendo um total de 5 pontos de medição por amostra. O tempo de reverberação utilizado para cálculos caracteriza-se pela média destas 5 medições. A área da base da câmara reverberante 1:5 preenchida por amostras para ensaio foi de $S=0,4661\text{m}^2$, sendo utilizados 2 painéis ou espumas inteiros e 1 painel ou espuma cortado ao meio. A Figura 32 apresenta uma representação da superfície da câmara reverberante 1:5 preenchida com amostra, além do posicionamento do microfone e da fonte sonora para as medições.

Figura 32 – Representação da superfície da câmara reverberante 1:5 preenchida pelas amostras e posicionamentos do microfone (M) e fonte sonora.

As medições também foram feitas para a câmara vazia. Deste modo, os coeficientes de absorção sonora são obtidos por meio dos tempos de reverberação da câmara com e sem material, sendo os cálculos realizados conforme as Equações 15 e 16 citadas pela norma ISO 354 (1985).

$$A = 55,3 \times \frac{V}{c} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (15)$$

Onde: A representa a área de absorção sonora equivalente (m^2) da amostra; V é o volume (m^3) da câmara vazia; c refere-se à velocidade do som no ar (m/s); T_1 é o tempo de reverberação (s) da câmara vazia; T_2 é o tempo de reverberação (s) da câmara contendo a amostra.

$$\alpha_s = \frac{A}{S} \quad (16)$$

Onde: α_s representa o coeficiente de absorção sonora; A é a área de absorção sonora equivalente (m^2) da amostra e S é a área total da amostra (m^2).

3.6.7.1 Medições preliminares

Para otimização do ensaio de absorção sonora, verificou-se em medições preliminares o efeito da quantidade de borracha (50% e 75%) no coeficiente de absorção dos painéis de partículas. Deste modo, foram testadas as amostras 5, 6, 9 e 10, referentes aos painéis de 50% de borracha, e as amostras 13, 14, 17 e 18, referentes aos painéis de 75% de borracha, diretamente na base da câmara reverberante.

3.6.7.2 Medições principais

As medidas acústicas da absorção sonora foram realizadas nos painéis de partículas dos tratamentos de 1 a 12. Baseando-se no estudo preliminar, foram selecionadas as amostras

contendo 50% de borracha (tratamentos 5 a 12), objetivando analisar o efeito da adição de borracha nos painéis em relação às amostras testemunhas 100% madeira (tratamentos 1 a 4). Seleccionadas as amostras, foram determinadas as condições de ensaio, simulando situações em termos de montagem nas quais as composições termoacústicas pudessem resultar em melhor desempenho fonoabsorvente, quando aplicados como painéis de revestimentos. Neste sentido, estabeleceu-se o planejamento de ensaio descrito na Tabela 16. Para as amostras de espumas (mamona e comercial), foram realizadas medições da absorção sonora separadamente e como preenchimento dos painéis de partículas.

A caixa de ar foi simulada com um esquadro produzido em madeira, de mesma área das amostras e espessura de 50 mm. A altura do esquadro foi adotada com base em espaçamentos mencionados na norma ABNT NBR 12179 (1992) e também em especificações de painéis de absorção comerciais. O esquadro não apresentou influência nas medições da absorção sonora dos painéis compostos, fato comprovado por medições apenas do esquadro na câmara reverberante 1:5.

As Figuras 33 e 34 apresentam os ensaios nas diferentes montagens das etapas de 1 a 7 (Tabela 16). Exceto na etapa 2, todos os painéis dos tratamentos configurados em camadas foram posicionados com a camada de madeira voltada para cima (em relação à base da câmara).

Tabela 16 – Planejamento de ensaio: determinação dos coeficientes de absorção sonora

Etapas	Descrição
1	Teste das 12 amostras de painéis em contato com a base da câmara
2*	Teste de amostras de dois tratamentos contendo borracha em camada (distinguindo-se em termos de pressões de prensagem) com a borracha voltada para cima, com painel em contato com a base da câmara.
3	Teste da espuma comercial em contato com a base da câmara
4	Teste da espuma derivada da mamona em contato com a base da câmara
5	Teste das 6 amostras de painéis com melhor desempenho com caixa de ar de 5 cm
6	Teste das 6 amostras seleccionadas na etapa 5 com a espuma comercial no interior da caixa de ar
7	Teste das 6 amostras seleccionadas na etapa 5 com a espuma derivada de mamona no interior da caixa de ar

*Seleccionadas as amostras 6 e 8, sendo então chamadas de 6B e 8B.

Figura 33 – Montagem das composições termoacústicas: a) etapas 1; b) etapa 2; c) etapas 3 e 4.

Figura 34 – Montagem das composições termoacústicas: a) etapa 5; b) etapas 6 e 7.

O principal mecanismo de absorção sonora a que se referem os painéis propostos é aquele do tipo material poroso/fibroso, os quais são aplicados diretamente nas paredes e absorvem principalmente altas frequências. Entretanto, foram adotados sistemas de montagem simulando superfícies montadas sobre as paredes, com espaço de ar entre elas ou preenchidas com material absorvedor, no caso a espuma poliuretana, possibilitando uma melhora quanto à absorção sonora em baixas frequências (MARTINS, 2008). Everest (2001) ressalta que a montagem tem um grande efeito sobre as características de absorção do material que, no caso

de materiais porosos é consideravelmente superior com espaço de ar entre o material e a parede.

Determinou-se a frequência de ressonância dos painéis quando simuladas as situações de camada de ar e preenchimento com espuma, conforme descrito anteriormente (Equação 1). Para as amostras contendo 100% madeira, a frequência de ressonância calculada foi de 80 Hz e, para painéis 100% madeira/50% borracha, este valor foi de 67 Hz.

3.6.7.3 Análise dos resultados – Absorção Sonora

Os resultados obtidos no ensaio para determinação da absorção sonora dos painéis e espumas poliuretanas não foram tratados estatisticamente, visto que, a diferença dos valores de coeficiente de absorção sonora em certas frequências (maiores ou menores) acarreta em diferentes respostas ou comportamento dos materiais de absorção, possibilitando seu direcionamento para diferentes ambientes. De acordo com Martins (2008), a qualidade acústica de um material não pode ser avaliada unicamente pelo próprio material em si (pelas suas características), mas sim em função das necessidades do espaço onde este será aplicado, conhecendo-se a gama de frequências que se pretende “absorver”; por exemplo: as necessidades de reverberação de um estúdio de gravação não são necessariamente as mesmas de uma sala de ópera, onde se exige um tempo de reverberação maior, logo com necessidades de absorção menores.

Para este trabalho, objetivou-se indicar as melhores configurações e composições termoacústicas, de acordo com o mecanismo de absorção, que demonstre potencial para aplicação como painéis de revestimento. Além disso, algumas composições foram comparadas a produtos fonoabsorventes comerciais e materiais que constam na norma ABNT NBR 12179 (1992) e na norma IS 3308 (1981).

4 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na caracterização dos insumos utilizados, estudo preliminar para definição dos parâmetros envolvidos na produção dos painéis, além da caracterização morfológica, física, mecânica, térmica e acústica dos painéis de partículas e espumas poliuretanas.

4.1 Estudo preliminar

Os resultados obtidos nas etapas do estudo preliminar, para as propriedades físicas dos painéis em camadas (C), mistura de borracha (MB) e camada central de borracha (CB), são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades físicas dos painéis – Estudo preliminar.

Etapa	Amostra	D (g/cm³)	IE - 2 h (%)	IE - 24h (%)	AA - 2h (%)	AA - 24h (%)
1	C	$\bar{x}$	0,59 aA	2,27 bA	4,13 aA	17,22 bA
		CV (%)	5,67	20,26	13,55	35,04
	MB	$\bar{x}$	0,54 abB	3,02 aA	4,39 aA	30,79 aA
		CV (%)	6,48	15,16	14,18	16,35
	CB	$\bar{x}$	0,51 b	3,16 a	4,47 a	31,4 a
		CV (%)	12,34	13,61	12,76	16,17
2	C	$\bar{x}$	0,62 aA	2,62 aA	4,34 aA	10,32 bB
		CV (%)	4,7	12,77	12,51	10,87
	MB	$\bar{x}$	0,62 aA	2,36 aB	3,65 bB	18,52 aB
		CV (%)	7,86	14,06	12,26	29,41
		$\bar{x}$	0,62 aA	2,62 aA	4,34 aA	10,32 bB
		CV (%)	4,7	12,77	12,51	10,87

*Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente, ao nível de 95% de probabilidade, quanto às configurações em relação à mesma etapa. **Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente, ao nível de 95% de probabilidade, quanto às etapas em relação à mesma configuração.

Em ambas as etapas, os painéis classificaram-se como de baixa densidade ($<0,64\text{g/cm}^3$), conforme a norma ANSI A208-1 (1999). Observou-se que apenas na etapa 2 a densidade dos painéis alcançou o valor nominal pré-determinado ($0,6\text{ g/cm}^3$). As menores densidades na etapa 1 podem estar relacionadas ao menor teor de adesivo empregado ou à possíveis perdas de material durante a produção dos painéis.

No inchamento em espessura em 2 horas, os painéis em ambas as etapas apresentaram-se condizentes com o valor máximo permitido de 8%, pela norma ABNT NBR 14810-2 (2006). Para a mesma propriedade em 24 horas, todas as etapas apresentaram amostras de acordo com o máximo de 8% e de 14%, definidos, respectivamente, pelas normas ANSI A208-1 (1999) e EN 312 (2003).

Verificou-se que, na etapa 1, a configuração camadas (C) apresentou desempenho superior para as propriedades físicas quando comparada às demais configurações (mistura e camada central borracha), considerando-se a diferença estatística dos resultados. Para a mesma configuração de painel nas diferentes etapas, foi possível observar que os parâmetros da etapa 2 resultaram em melhores propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água para a configuração mistura (MB). Para os painéis em camadas (C), as variáveis de produção foram influentes apenas para a absorção de água em 2 horas.

A Tabela 18 apresenta os valores das propriedades mecânicas no estudo preliminar.

Tabela 18 – Propriedades mecânicas dos painéis – Estudo preliminar.

Etapa	Amostra	MOR (MPa)		MOE (MPa)		RTP (MPa)	
1	C	$\bar{x}$	3 aB	232 aB		0,51 aB	
		CV (%)	17,86	15,68		35,24	
	MB	$\bar{x}$	2 bB	149 bB		0,36 aB	
		CV (%)	40,14	35,37		46,72	
	CB	$\bar{x}$	1 b	216 ab		0,38 a	
		CV (%)	35,03	30,34		47,6	
2	C	$\bar{x}$	6 aA	309 aA		0,92 aA	
		CV (%)	17,33	18,39		15,69	
	MB	$\bar{x}$	4 bA	285 aA		0,7 bA	
		CV (%)	25,85	25,54		15,18	

*Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente, ao nível de 95% de probabilidade, quanto às configurações em relação à mesma etapa. **Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente, ao nível de 95% de probabilidade, quanto às etapas em relação à mesma configuração.

Os valores de MOR apresentaram-se coerentes com o requisito 3 MPa, para painéis classificados como LD-1 (baixa densidade), conforme a norma ANSI A208.1 (1999), exceto para as amostras MB e CB da etapa 1. A mesma classificação da norma americana estabelece para o MOE o valor de 500 MPa, não atingido pelos painéis das duas etapas. Este fato pode estar relacionado à presença da borracha, que influi na rigidez do painel. Estudos com emprego de resíduos de borracha de pneu em diferentes proporções, de Macedo (2008) com painéis de madeira e Giacobbe (2008) com concreto reforçado, mostram que maiores proporções de borracha de pneu na produção de painéis reduziram significadamente a propriedade de módulo de elasticidade na flexão estática.

Na tração perpendicular às faces observa-se que os painéis obtidos no estudo preliminar obedecem ao requisito de 0,1 N/mm² (0,1 MPa) da classificação LD-1 designada pela ANSI A208.1 (1999). Comparando-se à ABNT NBR 14810-2 (2006), que estabelece 0,4 MPa para painéis aglomerados de densidade entre 551 kg/m³ a 750 kg/m³, observa-se que apenas as amostras da etapa 2 estão em conformidade com este requisito, com valores até 100% superiores ao requisito normativo.

Em relação à análise estatística dos resultados, considerando-se apenas a etapa 1, foi possível observar que os painéis nas configurações camadas (C) e mistura de borracha (MB) apresentaram propriedades mecânicas superiores em relação à configuração contendo borracha na camada central (CB). A etapa 2 proporcionou desempenho mecânico superior para ambas as configurações em comparação à etapa 1, demonstrando que os parâmetros de produção (pressão e temperatura de prensagem, teor de adesivo) também podem ser influentes nestas propriedades.

Baseando-se nos resultados do estudo preliminar e em revisão de literatura, foram adotadas para o estudo principal variações quanto à pressão de prensagem, configuração, porcentagem de borracha de pneu e espessura dos painéis, as quais possam apresentar maior influência nas propriedades termoacústicas. Foram determinados como parâmetros fixos o teor de adesivo e a temperatura de prensagem, também com base em estudo anterior de Bertolini et al. (2013).

4.2 Caracterização das partículas de madeira e de borracha

4.2.1 Análise granulométrica

A Tabela 19 apresenta a classificação de dimensões para as partículas de madeira e de borracha de pneu, com as massas e porcentagens de material retidas em cada peneira.

Tabela 19 – Distribuição granulométrica das partículas de madeira e de borracha.

Peneira (mesh)	Abertura Peneira (mm)	Média Massa Retida (g)		Média Massa Retida (%)	
		Madeira	Borracha	Madeira	Borracha
4	4,76	-	0,68	-	0,34
5	4,00	-	31,40	-	15,30
7	2,83	0,65	66,63	0,32	33,52
10	2	23,90	80,50	11,95	40,50
16	1,19	54,56	19,00	27,28	9,56
30	0,59	98,51	1,13	49,25	0,57
40	0,42	11,00	-	5,50	-
Finos	<0,42	11,18	0,42	5,69	0,21
Total		199,80	199,76	100,00	100,00

Verificou-se por meio das porcentagens retidas que, no caso da madeira, grande parte das partículas retidas se concentraram nas peneiras de 10, 16 e 30 *mesh*, aproximadamente 88,48%, ou seja, este material possui predominantemente partículas entre 0,59 mm a 2,00 mm. A Figura 35 mostra as partículas de madeira retidas em cada abertura de peneira.

Figura 35 – Classificação de tamanhos de partículas de madeira.

A distribuição granulométrica está condizente com trabalhos nos quais se utilizou procedimento semelhante para obtenção das partículas, como: Bertolini et al. (2013), com distribuição predominante de 72% entre 16 e 30 *mesh* (0,59mm a 1,19mm); e de Varanda (2012) com 70% de partículas de *Eucalyptus grandis* e 75,3% de casca de aveia retidas predominantemente entre peneiras de 16 e 30 *mesh*.

O tamanho das partículas proporciona considerável efeito sobre as propriedades dos painéis. A granulometria de partículas utilizadas neste trabalho, compreendida em grande parte entre 16 e 30 *mesh* (de 0,59 mm a 1,19 mm), mostra-se coerente com estudos abrangendo resultados significativos.

Pan et al. (2007) avaliaram a influência do tamanho das partículas nas propriedades físicas e mecânicas de painéis produzidos com *Eucalyptus cinerea* e ureia-formaldeído. Foram produzidos três tipos de amostras, diferindo-se quanto à granulometria: 10 a 20 *mesh*; 20 a 40 *mesh*; e 40 a 60 *mesh*. Os autores verificaram que melhores propriedades de MOR, MOE, adesão interna, inchamento em espessura e absorção de água foram obtidos para painéis provenientes de partículas de 20 a 40 *mesh*. O mesmo efeito foi observado por Zheng et al. (2006), com painéis da espécie *Tamarix aphylla* e ureia-formaldeído, com melhores propriedades mecânicas e de resistência à água para painéis de partículas de 20 a 40 *mesh*, quando comparados às amostras utilizando tamanhos de partículas menores (40 a 60 *mesh*) e maiores (10 a 20 *mesh*).

Santos et al. (2014) produziram painéis de rejeitos de Tauari (*Couratari oblongifolia*), com partículas classificadas entre peneiras de 14 a 18 *mesh* (1 a 1,14 mm), e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Segundo os autores, os painéis resultaram em propriedades físicas e mecânicas superiores às principais normas adotadas como referência – ABNT NBR 14810-2 (2006); EN 312 (2003) e ANSI A208-1 (1999).

Em relação aos grânulos de borracha, 98,9% do material ficou retido nas peneiras de 5, 7, 10 e 16 *mesh*, com dimensões compreendidas de 2 a 4 mm. Apesar do resíduo de borracha de pneu adquirido ser comercializado com tamanho de 5 *mesh*, todo material quando processado em moinhos/picadores resulta em certa quantidade de “finos”. Rodrigues (2008), em estudos para produção de compósitos, analisou a granulometria de resíduos de borracha de pneu fornecidos com tamanho de 5 *mesh*, verificando que 97% do material apresentava grânulos entre 1,2 e 2,4 mm.

A Figura 36 exibe a classificação de tamanhos dos grânulos de borracha de pneu retidos em cada abertura de peneira.

Figura 36 – Classificação de tamanhos dos grânulos de borracha de pneu.

A quantidade de material considerado “finos”, com granulometria menor que 0,42 mm, representa apenas 5,69% das partículas de madeira e 0,21% da borracha de pneu. Os “finos”, quando em pequena quantidade, auxiliam no processo de adesão na produção dos painéis de madeira aglomerada, conforme relatado em estudos de Nascimento (2003), Bertolini (2011) e Varanda (2012). No caso do resíduo de borracha de pneu, este efeito pode ser ainda mais favorável, já que ocorre em grande parte uma adesão superficial entre este e a resina PU de mamona, podendo os “finos” auxiliar na ligação com os grânulos de maior dimensão.

Teixeira e César (2006) analisaram material madeireiro de serrarias, provenientes de serra fita, serra industrial, furadeira, plaina e desempenadeira, classificando-os como resíduos fino, médio e grosso. Os resíduos de menores dimensões, chamados de “finos”, referiam-se ao material retido e passante na peneira de 0,59 mm (30 mesh), definido pelos autores como “[...] material granuloso, com fases indo do pó fino como talco até grãos com textura similar à farinha de mandioca e ainda partículas fibrosas, macias e maleáveis ao toque [...]”.

No entanto, no trabalho em questão, os “finos” foram relacionados ao material conhecido como farinha de madeira. Vianna, Correa e Razzino (2004), em estudos com compósitos de plástico-madeira (WPC), adquiriram a farinha de madeira de *Pinus* sp. comercializada com especificação granulométrica de 45 mesh. Com a classificação por peneiramento em agitador eletromecânico por 10 minutos, os autores observaram que a maior porcentagem de resíduos ficou retida nas malhas de 40 mesh (0,42 mm) e 60 mesh (0,25 mm).

4.2.2 Teor de umidade das partículas

O teor de umidade obtido para as partículas de madeira é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Valor médio do teor de umidade obtido para as partículas de *Pinus* sp. tratado com CCB.

Amostra	Teor de Umidade (%)
1	9,32
2	9,51
3	9,26
$\bar{x}$	9,36
CV (%)	1,39

O conteúdo de umidade de 9,36 % das partículas de *Pinus* sp. com CCB apresentou-se coerente com o valor requerido quando utilizados adesivos poliuretanos, como a resina à base de óleo de mamona na fabricação de painéis. Segundo Maciel (2001), os adesivos isocianatos ou MDI necessitam de teores de umidade da ordem de 7 a 10%. Além da reação principal entre os componentes da resina e os grupos hidroxilas presentes na estrutura dos materiais lignocelulósicos, como a madeira (PAPADOPOULOS et al. 2002), podem ocorrer também reações paralelas como a do isocianato (grupo altamente reativo) com a água, liberando dióxido de carbono (CO₂) e promovendo a expansão do polímero (SILVA, 2003).

O teor de umidade também é bastante relevante na prensagem dos painéis. Neste processo, a transferência de calor no interior do painel é comandada pela umidade do material prensado e essa transferência de calor promove a cura da resina (MOSLEMI, 1974). Entretanto, deve-se controlar o teor de umidade das partículas de madeira, uma vez que a umidade residual pode ser convertida em vapor durante a prensagem a quente. A liberação repentina deste vapor durante a abertura da prensa promove delaminação ou bolhas no painel (THOEMEN, IRLE e SERNEK, 2010).

A determinação do teor de umidade para a borracha de pneu não foi possível, uma vez que a termobalança registrou valores próximos a zero e a dilatação do material com a temperatura impossibilitou o término do ensaio. Segundo Kumar, Thomas e Grohens (2013), a borracha de pneu é praticamente hidrofóbica e é minimamente afetada pela umidade atmosférica. Sendo assim, desconsiderou-se esta determinação para a borracha.

4.3 Caracterização dos painéis de partículas e espumas poliuretanas

4.3.1 Estabilidade térmica - Análise termogravimétrica

As Figuras 37 a 40 apresentam as curvas termogravimétricas referentes às amostras de: painel – região de madeira (Pmad); painel – região de borracha (Pbo); espuma PU derivada do óleo de mamona (Emam); espuma PU comercial (Ecom).

Figura 37 – Curva termogravimétrica para a amostra de painel – região de madeira (Pmad).

Figura 38 – Curva termogravimétrica para a amostra de painel – região de borracha (Pbo).

Figura 39 – Curva termogravimétrica para a amostra de espuma PU derivada do óleo de mamona (Emam).

Figura 40 – Curva termogravimétrica para a amostra de espuma PU comercial (Ecom).

Segundo Matos e Machado (2004), por meio da curva termogravimétrica (TG) é possível detectar a temperatura T_{onset} , definida como início extrapolado do evento térmico, ou seja, uma estimativa da temperatura na qual se inicia a degradação térmica do material, sendo sua temperatura de decomposição térmica experimental. T_{endset} refere-se ao final deste fenômeno.

Com base nas curvas TG obtidas nas mesmas condições de ensaio, é possível comparar-se a estabilidade térmica relativa das amostras analisadas (MATOS e MACHADO, 2004). Observou-se que as temperaturas T_{onset} de todas as amostras foram próximas: Pmad = 278 °C, Pbor = 245 °C, Emam = 276 °C e Ecom = 298 °C. A amostra da região de borracha do painel resultou na menor estabilidade térmica, enquanto o material com maior estabilidade foi a espuma comercial.

A Tabela 21 apresenta as etapas, com seus intervalos de temperatura e porcentagem de perda de massa, que ocorreram na decomposição térmica das amostras.

Tabela 21 - Intervalos de temperatura e perda de massa das curvas TG.

Amostra	1º Etapa		2º Etapa		3º Etapa		Resíduo (%)
	Intervalo de T (°C)	Perda de Massa (%)	Intervalo de T (°C)	Perda de Massa (%)	Intervalo de T (°C)	Perda de Massa (%)	
Pmad	20 – 181	6,34	181 – 565	86,9	-	-	6,76
Pbo	-	-	197 - 636	92,62	-	-	7,38
Emam	-	-	200 - 426	39,92	426 - 591	56,89	3,19
Ecom	75 – 221	3,37	221 - 418	46,5	418 - 677	46,91	3,22

A Figura 37 mostra por meio da curva TG que, para a amostra Pmad, o processo de degradação ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa, ocorreu uma perda de massa de 6,34%. Pela curva DTG (em azul), derivada da curva termogravimétrica, observou-se que esta pequena perda de massa inicial ocorreu à aproximadamente 50 °C, e se refere, provavelmente, à umidade da madeira (PEREIRA et al. 2013). Em uma segunda etapa, referente à reação principal, ocorreu duas reações secundárias e próximas, com picos de degradação máxima nas temperaturas de 322 °C e de 392 °C, com perda de massa de 86,9%.

Para a amostra de Pbo (Figura 38), a curva TG mostra que a degradação térmica ocorreu em apenas uma etapa. Pela curva DTG observou-se que a reação principal apresentou 5 reações próximas e sucessivas. A perda de massa foi de 92,62%, compreendida no intervalo de 197 °C a

636 °C (Tabela 21). Os picos de degradação ocorreram nas temperaturas de 288 °C, 389 °C, 428 °C, 503 °C e 555 °C (curva DTG).

Stefani et al. (2005) cita que, em análises termogravimétricas da borracha de pneu, a perda de substâncias voláteis como óleos, aditivos, plastificantes, entre outros, na degradação térmica, ocorre entre 150 °C e 350 °C. Na sequência, ocorre a decomposição dos demais componentes como borracha natural, borracha de butadieno, borracha de estireno-butadieno. No trabalho em questão, a perda de massa na degradação da borracha teve início em temperatura superior, a partir de 197°C. Este comportamento pode estar relacionado à presença do adesivo poliuretano a base de mamona no material analisado (Pbo), por se tratar de uma região do painel de partículas que contém somente borracha e adesivo.

Observa-se que, na reação principal das amostras Pmad e Pbo (Figuras 37 e 38), ocorrem simultaneamente reações secundárias. Isto pode estar relacionado ao fato de que alguns componentes do material podem apresentar temperaturas de degradação muito próximas, ocorrendo uma série de reações sucessivas (MATOS e MACHADO, 2004).

Em relação à espuma Emam (Figura 39), foi verificado pela curva TG que a degradação térmica ocorreu em duas etapas. A Tabela 21 mostra que, no intervalo de 200 °C a 426 °C ocorreu perda de massa de 39,92% e de 426°C a 591 °C essa perda foi de 56,89%. Os picos de degradação mostrados na curva DTG corresponderam às temperaturas de 324 e 532 °C.

Na amostra Ecom (Figura 40), as curvas TG e DTG mostram a degradação em três etapas. Ocorreu uma pequena perda de massa de 3,37% na 1ª etapa, porém as principais degradações foram de 46,5% e de 46,91%, em intervalos de temperatura específicos (Tabela 21). A curva DTG mostra que os picos de degradação ocorrem em 149 °C, 327 °C e 545 °C.

Para espuma de origem vegetal, as perdas de massa principais referem-se, sucessivamente, a quebra das ligações uretanos (de 300 a 400°C) e ao rompimento da ligação éster oriunda do polioliol (de 400 a 500°C). Em espumas PU de petróleo, ocorre a quebra das ligações uretanos (200 a 300°C) e posteriormente a cisão do grupo éter (350 a 450 °C) (CLARO NETO, 1997; CANGEMI et al., 2006).

Jiao et al. (2013) notaram em ensaio de termogravimetria de espumas PU, perda de massa de aproximadamente 3% na faixa de temperatura de 110 °C a 190 °C, relacionando esta degradação à evaporação de água ou à alguns produtos existentes em sua composição. Por meio do ensaio de FTIR (*Fourier Transform Infrared Radiation* - espectroscopia de infravermelho), os autores identificaram os voláteis detectados na degradação inicial, a aproximadamente 167°C, como sendo os agentes de expansão das espumas PU. No trabalho em questão, a ocorrência deste

estágio inicial de degradação térmica foi notada apenas na espuma PU comercial (Ecom), o que pode estar relacionado ao gás de expansão.

Segundo Roaf; Fuentes e Thomas. (2014), isolamentos de edificações em espuma, quando incendiados, podem queimar com maior intensidade que os produtos compostos por celulose, sendo obrigatório o uso de uma camada de proteção mais espessa entre este isolamento e o ambiente. Deste modo, restringe-se o fluxo de ar ao produto, buscando prevenir emissões rápidas de voláteis inflamáveis/tóxicos (por exemplo, carbonos orgânicos voláteis – VCOs).

Sendo assim, o sistema de montagem é de extrema importância em elementos construtivos para fins termoacústicos, prevenindo-se também a exposição de alguns de seus componentes em situações de risco.

4.3.2 Caracterização morfológica

Os resultados referentes à caracterização morfológica das amostras de painéis de partículas e espumas são apresentados neste tópico. Algumas análises de MEV foram mencionadas nas discussões da propriedade de absorção sonora dos painéis.

4.3.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 41 apresenta uma visão geral das amostras de painéis M (4), B(4), M(2,5) e B(2,5). Estas imagens de MEV, as quais representam as regiões de madeira e de borracha dos painéis, mostram claramente a diferença de tamanho das partículas de madeira e grânulos de borracha, quando considerada a mesma resolução da imagem. Nas regiões de borracha, fica evidenciada a microestrutura com maior incidência de vazios em painéis com menor pressão de prensagem, comparando-se as Figuras 41b e 41d.

A Figura 42 apresenta imagens com maior resolução das amostras de painel contendo somente madeira M(4) e M(2,5), o que possibilita observar vazios mais evidentes nos painéis de 2,5 MPa. Nas amostras de borracha (Figuras 42c e 42d), estes vazios são percebidos em B(4) e B(2,5), ou seja, nas duas condições de prensagem. Cabe ressaltar que a análise dos vazios por imagens de MEV é apenas qualitativa, sendo a porosidade obtida quantitativamente pela Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.

Figura 41 – Imagens de MEV com visão geral das amostras: (a) M(4) – região de painel madeira (4 MPa); (b) B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa); (c) M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa); (d) B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).

Figura 42 – Imagens de MEV representando vazios (em destaque) na microestrutura de amostras: (a) M(4) – região de painel madeira (4 MPa); (b) M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa); (c) B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa); (d) B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).

Em relação à distribuição do adesivo, as micrografias mostram comportamentos diferentes para a interação (adesão mecânica) da resina com a madeira e com a borracha de pneu. A Figura 43 apresenta amostras dos painéis de madeira, indicando que o adesivo também se fixa à madeira superficialmente, sendo possível adentrar em sua estrutura anatômica, como elementos de vaso e pontoações (Figuras 43b e 43c).

Figura 43 – Imagens de MEV representando a distribuição do adesivo (em destaque) nas amostras de painéis de madeira: (a) adesivo na superfície das partículas de madeira; (b) topo da partícula contendo o adesivo; (c) região de pontoações da microestrutura da madeira.

A Figura 44 demonstra a interação da resina poliuretana de mamona com a borracha. É possível notar que o adesivo se liga em grande parte superficialmente, devido à própria microestrutura da borracha não proporcionar a penetração do adesivo.

Figura 44 - Imagens de MEV representando a distribuição do adesivo (em destaque) nas amostras de painéis de regiões de borracha: adesivo ligado superficialmente nos grânulos de borracha.

A interação entre os componentes (madeira e borracha) nas configurações dos painéis em camadas (C) e mistura de borracha (MB), demonstrada por imagens da visão geral do corpo de prova, são apresentadas na Figura 45.

Figura 45 – Imagens de MEV com visão geral das amostras: (a) C(4) região de separação das camadas madeira e borracha (4 MPa); (b) MB(4) – painel de mistura borracha (4MPa); (c) C(2,5) região de separação das camadas madeira e borracha 2,5 MPa; (d) MB(2,5) – painel de mistura borracha (2,5 MPa).

A Figura 46 apresenta imagens de MEV com maior aproximação das situações descritas na figura anterior, para as amostras C e MB, possibilitando visualizar a adesão entre as partículas de madeira e grânulos de borracha. Observa-se por meio do local de adesão (interface) das partículas e por suas características, que a borracha não se funde às partículas de madeira, o que sugere uma adesão em grande parte mecânica promovida pelo adesivo.

Figura 46– Imagens de MEV para análise da adesão entre as fases: (a) representação da interface entre toda a partícula de madeira e grânulo de borracha e; (b) “destaque” da região de interface.

A Figura 47 apresenta as imagens de MEV das espumas poliuretanas: comercial (COM) e à base de óleo de mamona (MAM), mostrando uma visão geral das amostras.

Figura 47 – Imagens de MEV – visão geral da estrutura das espumas poliuretanas: (a) amostra COM; (b) amostra MAM.

A estrutura das espumas PU é formada por células, que podem ser abertas ou fechadas, bastante influenciadas pelo método de fabricação (expansão e polimerização) e pela composição - agente de expansão e natureza do polioliol - número de hidroxilas (Zhu et al. 2012). No que diz respeito à morfologia das espumas (Figura 47), é possível observar que a amostra COM apresenta estrutura com “células” de tamanhos mais uniformes, quando comparada à amostra MAM, com células de tamanhos variados. Outro fator observado nas espumas foram as rupturas nas paredes das células (Figura 48).

Figura 48 – Imagens de MEV – rupturas das células das espumas: (a) e (b) COM; (c) e (d) MAM.

As células da espuma PU comercial (Figuras 48a e 48b) apresentam rupturas em menor quantidade, ocorrendo somente em alguns pontos. Na amostra MAM (Figuras 48c e 48d) estas rupturas ocorrem em toda a estrutura da espuma PU e com maior intensidade, não somente no centro das células.

Gu; Sain e Konar (2013), em estudos abrangendo espumas PU contendo isocianato (PMDI) e polioli proveniente de óleo de soja, relataram que a água destilada utilizada como agente de expansão proporciona uma parede celular mais fina, o que pode afetar a resistência mecânica da espuma. No trabalho em questão, a espuma PU à base de mamona, também utiliza a água como agente de expansão. Estas rupturas na MAM podem ter ocorrido durante a expansão, justamente pelas paredes mais finas das células.

Segundo Harikrishnan; Umasankar Patro e Khakhar (2006), nas espumas de células abertas, as lamelas de separação das células adjacentes são rompidas durante o processo de formação da espuma. Nas espumas de células fechadas, estas lamelas permanecem intactas. No caso de espumas contendo gás como agente de expansão, grande parte das células deve ser fechada, para assegurar que este gás de baixa condutividade térmica permaneça enclausurado nestas estruturas.

Apesar da observação da estrutura morfológica pelo MEV das espumas produzidas neste trabalho, e relação com algumas das suas propriedades finais (física, térmica, acústica), as características das espumas também dependem de outros fatores.

As características físico-químicas das espumas são influenciadas tanto pela morfologia macroscópica quanto pela microscópica, tornando de difícil separação o efeito de cada um desses grupos morfológicos nas suas características finais. A morfologia macroscópica diz respeito ao teor de vazios (com influência na densidade aparente) e tamanho, distribuição e conteúdo de células abertas, enquanto a microscópica refere-se à estrutura do polímero - flexíveis e rígidas (SERVES, 2007; VAUGHAN et al., 2011).

4.3.2.2 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – painéis de partículas

As Figuras 49 a 52 apresentam as curvas padrão de intrusão porosimétrica das amostras, demonstrando o comportamento quanto à distribuição de diâmetro dos poros.

Figura 49 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras M(4) – região de painel madeira (4 MPa) e M(2,5) – região de painel madeira (2,5 MPa).

Figura 50 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras B(4) – região de painel parte borracha (4 MPa) e B(2,5) – região de painel parte borracha (2,5 MPa).

Quanto à distribuição do tamanho dos poros, foi observado tanto para as amostras de madeira M(4) e M(2,5), quanto para amostras de regiões de borracha B(4) e B(2,5), Figuras 49 e 50, grande parte dos poros em dois intervalos: diâmetros menores que 5 μm e entre 7,5 e 15 μm . Porém, o que se destaca é o volume de intrusão do mercúrio nos poros que, para amostras de madeira, alcançou valores próximos de 0,7 mL/g, enquanto para amostras de borracha este volume foi bem inferior, aproximadamente 0,1 mL/g.

Figura 51 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras MB(4) – painel de mistura borracha (4MPa) e MB(2,5) – painel de mistura borracha (2,5MPa).

Figura 52 - Curva padrão de Intrusão Porosimétrica: Amostras C(4) região de separação das camadas madeira e borracha (4 MPa) e C(2,5) região de separação das camadas madeira e borracha (2,5 MPa).

Para as amostras de painéis MB e C (Figuras 51 e 52), em ambas as pressões de prensagem, observou-se tendência semelhante na distribuição do tamanho dos poros, em dois intervalos: diâmetros menores que 5 μm e entre 7,5 e 15 μm . Notou-se um comportamento intermediário destas em relação às amostras M e B, nas quais o volume de intrusão para

amostras MB apresentou valores por volta de 0,3 mL/g, enquanto as amostras C apresentaram 0,2 mL/g, possivelmente devido à camada de borracha.

Analisando-se as Figuras 49, 51 e 52, referentes às amostras M(4), M(2,5), MB(4), MB(2,5), C(4) e C(2,5), as curvas mostram em seu trecho inicial o fenômeno de “extrusão”, que ocorre após a intrusão do mercúrio a pressões aumentadas para que este penetre em poros de diâmetros menores. Em seguida esta pressão é diminuída substancialmente até a pressão atmosférica, fazendo com que parte do mercúrio saia dos poros (MATA, 1998).

A seguir, apresentam-se as características porosimétricas das amostras de painéis de partículas nas duas condições de prensagem, submetidas ao ensaio de PIM. A Tabela 22 exhibe dados das amostras de painéis contendo apenas um insumo – madeira (M) ou borracha (B) – e a Tabela 23 estes dados para amostras de painéis com os dois insumos nas configurações camada (C) e mistura borracha (MB).

Tabela 22 – Características porosimétricas dos painéis de partículas – amostras contendo madeira (M) e amostras contendo borracha (B).

Características porosimétricas	Amostra			
	M(4)	M(2,5)	B(4)	B(2,5)
Volume Total de Intrusão (mL/g)	0,86	0,79	0,096	0,1
Área Total de poros (m ² /g)	9,23	14,12	15,6	15,23
Diâmetro médio dos poros (µm)	19,15	30,02	0,11	1,05
Densidade (g/mL)	0,62	0,7	1,23	1,2
Densidade Aparente (g/mL)	1,35	1,6	1,39	1,37
Porosidade (%)	53,64	55,7	11,78	12,07

Tabela 23 - Características porosimétricas dos painéis de partículas – amostras contendo os insumos nas configurações camada (C) e mistura borracha (MB).

Características porosimétricas	Amostra			
	C(4)	C(2,5)	MB(4)	MB(2,5)
Volume Total de Intrusão (mL/g)	0,34	0,38	0,43	0,6
Área Total de poros (m ² /g)	15,3	16,27	16,47	14,72
Diâmetro médio dos poros (µm)	17,33	16,17	13,98	32,56
Densidade (g/mL)	0,94	0,95	0,86	0,8
Densidade Aparente (g/mL)	1,38	1,49	1,37	1,56
Porosidade (%)	32,02	36,26	37,26	48,5

Os dados obtidos para as amostras de painéis mostram claramente a diferença de porosidade (%) para amostras contendo apenas madeira e aquelas compostas unicamente por borracha, assim como para amostras contendo estes dois insumos em diferentes configurações.

Considerando-se amostras de mesma composição e configuração, é possível notar a influência da pressão de prensagem na porosidade. Os painéis produzidos com menor pressão (2,5 MPa) apresentaram maior porosidade, com diferenças variando de: 2,06% para M; 0,29% para B; 4,24% para C e 11,25% para MB. Além disso, maiores diferenças nas porosidades das amostras, levando-se em conta esta variação da prensagem, foram apresentadas para amostras contendo os dois insumos, em camadas ou em mistura.

A densidade das amostras (Tabelas 22 e 23), refere-se àquelas obtidas por meio do volume de mercúrio introduzido. Neste sentido, não podem ser consideradas como a densidade efetiva da amostra, pois, em determinadas pressões de ensaio, o mercúrio é introduzido em pressões específicas que muitas vezes não preenchem poros muito pequenos (ex: à pressão do mercúrio de 0,01 atm, o mercúrio não preenche poros de diâmetro inferior a 1230 μm) (MATA, 1998).

Poucos estudos têm sido realizados aplicando-se o método de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) em materiais não cerâmicos. Moura e Figueiredo (2002) aplicaram tal técnica para determinar massa volúmica, porosidade e distribuição de tamanho de poros na madeira de *Eucalyptus globulus* destinada à indústria de papel e celulose, relatando o caráter inovador desta técnica na determinação do tamanho de poros.

Para produtos derivados de madeira, Bertolini (2011) analisou a porosidade de painéis de partículas de densidade 0,90 g/cm³, constituídos de *Pinus* sp. tratado com CCB e resina PU de mamona, por meio da técnica de PIM, obtendo valores em média de 29%. Varanda (2012) analisou painéis particulados de densidade 0,93 g/cm³, contendo *Eucalyptus grandis* e resina a base de mamona, obtendo porosidade de 38,64%. Tomando como base as referências citadas, nas quais a pressão de prensagem dos painéis foi de 4 MPa, a análise deste estudo mostrou-se coerente, quando comparados aos painéis constituídos apenas por madeira, de menor densidade (densidade nominal 0,56g/cm³) e mesmo parâmetro de prensagem, com porosidade de 53,64%.

4.3.3 Densidade aparente – espumas poliuretanas

A Tabela 24 apresenta os valores médios da densidade aparente das espumas poliuretanas.

Tabela 24 – Valores médios da densidade aparente: espuma PU de mamona e espuma PU comercial.

Amostra	Densidade aparente (g/cm ³)	
	$\bar{x}$	CV (%)
Espuma PU comercial	0,038	2,17
Espuma PU de mamona	0,084	15,25

Alguns valores de densidade aparente apresentados por produtos semelhantes são: 0,039 g/cm³, para espuma PU derivada de soja (Wang e Zhou, 2011); 0,037 g/cm³, para espuma PU de mamona (Cardoso, 2010); e 0,04 g/cm³, para placa de poliuretano rígido comercial (ISAR, 2014).

Considerando-se os resultados obtidos, observa-se que apenas a espuma PU comercial apresentou valores coerentes com a literatura. A densidade da espuma poliuretana de mamona foi 2,2 vezes maior que a densidade da espuma comercial, além de maior coeficiente de variação dos resultados. Estas diferenças podem estar relacionadas às particularidades na produção. Apesar da massa de espuma permanecer nos limites do molde, a expansão da PU de mamona foi lenta, possivelmente ocasionando pontos de menor expansão. Todavia, a espuma comercial possui elevada velocidade de expansão e a massa expandida foi excedente ao molde, ocorrendo perda de material durante sua produção. Este comportamento também resultou em diferentes estruturas celulares das espumas, conforme mostrado anteriormente nas imagens de MEV (Figura 48), o que pode afetar não só a densidade, mas a condutividade térmica destes materiais.

A densidade possui estreita relação com a condutividade térmica dos materiais isolantes. No caso das espumas, a presença de ar ou gás de expansão, promove maior resistência ao fluxo de calor. No entanto, outras características podem ser influentes, uma vez que, segundo Han et al. (2009), a condutividade térmica pode ser reduzida através da redução do tamanho da célula da espuma PU rígida.

4.3.4 Propriedades físicas e mecânicas - painéis de partículas

Neste item são apresentados os resultados da caracterização física e mecânica dos painéis de partículas e a análise estatística que expõe os fatores e interações influentes nestas propriedades, em cada um dos três planejamentos experimentais delineados.

No Apêndice A constam os resultados para a validação da ANOVA nos três planejamentos investigados, por avaliação da normalidade nas distribuições dos resíduos por

variável-resposta (Teste de Anderson-Darling), homogeneidade dos resíduos dos tratamentos (Teste de Bartlett e de Levene) e independência dos resíduos (gráfico de resíduos *versus* ordem de observação). Os P-valores encontrados para os testes de normalidade e de homogeneidade entre variâncias para todas as respostas e para os três planejamentos investigados foram superiores ao nível de significância de 5% dos testes. Isto implica que as distribuições dos resíduos por variável são normais e que as variâncias dos resíduos por tratamento são equivalentes. Os gráficos de resíduos *versus* ordem evidenciam a inexistência de um padrão de comportamento para os resíduos, validando o modelo de ANOVA.

No Apêndice A constam também os gráficos para validação da ANOVA referentes à análise dos resíduos: normalidade; homogeneidade dos resíduos e independência dos resíduos por variável resposta (propriedade) e referentes aos planejamentos investigados. Nos gráficos que apresentam os resultados do teste de Anderson-Darling, os dados apresentaram-se distribuídos uniformemente na reta, demonstrando que foram atendidas as condições de normalidade.

4.3.4.1 Teor de umidade e Densidade

Os valores médios das propriedades de teor de umidade (TU) e densidade (D) dos painéis, referente aos 20 tratamentos são mostrados nas Tabelas 25, 26 e 27. Estes tratamentos representam, respectivamente, os painéis de composições 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha.

Tabela 25 - Valores médios do teor de umidade e densidade - painéis 100% madeira.

Tr		TU (%)	D (g/cm ³)
1	$\bar{x}$	10,67	0,59
	Cv (%)	2,45	6,7
2	$\bar{x}$	10,26	0,54
	Cv (%)	1,68	5,01
3	$\bar{x}$	9,75	0,55
	Cv (%)	1,94	16,79
4	$\bar{x}$	9,83	0,45
	Cv (%)	4,3	4,77

Tabela 26 - Valores médios do teor de umidade e densidade - painéis 100% madeira/50% borracha.

	Tr	TU (%)	D (g/cm³)
5	$\bar{x}$	6,39	0,66
	<i>Cv (%)</i>	8,72	7,59
6	$\bar{x}$	6,85	0,67
	<i>Cv (%)</i>	6,34	3,07
7	$\bar{x}$	6,33	0,69
	<i>Cv (%)</i>	4,84	5,1
8	$\bar{x}$	6,55	0,72
	<i>Cv (%)</i>	5,15	4,67
9	$\bar{x}$	6,57	0,69
	<i>Cv (%)</i>	3,87	5,18
10	$\bar{x}$	7,13	0,72
	<i>Cv (%)</i>	5,17	6,78
11	$\bar{x}$	6,82	0,75
	<i>Cv (%)</i>	3,93	6,95
12	$\bar{x}$	6,75	0,75
	<i>Cv (%)</i>	15,45	5,08

Tabela 27 - Valores médios do teor de umidade e densidade – painéis 100% madeira/75% borracha.

	Tr	TU (%)	D (g/cm³)
13	$\bar{x}$	6,51	0,77
	<i>Cv (%)</i>	4,21	1,92
14	$\bar{x}$	6,54	0,78
	<i>Cv (%)</i>	4,24	2,53
15	$\bar{x}$	6,28	0,83
	<i>Cv (%)</i>	5,2	2,5
16	$\bar{x}$	6,82	0,78
	<i>Cv (%)</i>	4,51	1,74
17	$\bar{x}$	5,65	0,82
	<i>Cv (%)</i>	5,66	12,6
18	$\bar{x}$	6,07	0,79
	<i>Cv (%)</i>	4	7,24
19	$\bar{x}$	6,41	0,78
	<i>Cv (%)</i>	5,22	4,82
20	$\bar{x}$	6,38	0,84
	<i>Cv (%)</i>	5,68	5,51

Em relação ao teor de umidade, os painéis contendo apenas madeira (Tabela 25) apresentaram teor de umidade entre 9,75% e 10,67%, valores superiores ao encontrado para o teor de umidade das partículas de madeira, de 9,36%. Tendência semelhante para maior teor de umidade dos painéis com relação às partículas utilizadas na produção foi observada na literatura. Santos et al. (2014) produziram painéis com partículas de Taurari (*Couratari oblongifolia*), com teor de umidade de 5% e resina poliuretana à base de mamona. Os autores estudaram diferentes condições de temperatura de prensagem, observando teor de umidade variando de 8,29% para 90°C e de 5,51% para 130°C, ou seja, maiores teores para menores temperaturas de prensagem.

Segundo Trianoski (2010) o teor de umidade ou a umidade de equilíbrio de produtos de madeira reconstituída difere da umidade de equilíbrio da madeira sólida devido às variáveis de processamento em que os primeiros são expostos, principalmente no processo de prensagem. Outros fatores podem influenciar a umidade de equilíbrio dos painéis de madeira como: secagem das partículas (modificação térmica); tratamento térmico; características da espécie; diferentes comportamentos de sorção dos adesivos em relação à madeira; entre outros (THOEMEN; IRLE e SERNEK, 2010).

O teor de umidade dos painéis contendo borracha (Tabelas 26 e 27) esteve entre 5,65% e 7,13%, sendo menor do que a umidade de painéis contendo apenas madeira. Este fato pode estar relacionado à adição da borracha que, além de possuir baixa umidade, é material quase hidrofóbico, minimamente afetado pela umidade atmosférica (SONG e HWANG, 2001; CHEUNG; JANSEN e HANSON, 2008).

Segundo a norma ABNT NBR 14810-2: 2006, os painéis de madeira aglomerada devem apresentar teor médio de umidade entre 5 e 11%. Para a EN 312 (2003), a umidade requerida para estes painéis deve estar compreendida entre 5 e 13%. Neste sentido, os painéis contendo somente madeira ou com adição de borracha apresentaram-se em conformidade com os documentos normativos.

Para a propriedade de densidade, os painéis referentes aos tratamentos contendo apenas madeira (Tabela 25) apresentaram densidade entre 0,45 g/cm³ e 0,59 g/cm³, se adequando na classificação de baixa densidade, de acordo com as normas ANSI A208.1 (1999) (<0,64g/cm³) e CS 236 (1966) (<0,6g/cm³).

Em relação aos tratamentos de composição 100% madeira/50% borracha, com densidade variando entre 0,66 g/cm³ e 0,75 g/cm³, os painéis classificam-se como de média densidade, conforme a norma ANSI A208.1 (1999) (0,64g/cm³ a 0,80 g/cm³) e CS 236 (1966) (0,6g/cm³ a 0,80 g/cm³).

Para os painéis contendo 100% madeira/75% borracha, os tratamentos 13, 14, 16, 18 e 19 apresentaram densidade entre 0,77 e 0,79 g/cm³, classificando-se como de média densidade pelas normas citadas. Os tratamentos 15, 17 e 20, com densidades entre 0,82 e 0,84 g/cm³ são considerados painéis de alta densidade (>0,80g/cm³), conforme ANSI A208.1 (1999) e CS 236 (1966).

Apesar da determinação da densidade nominal de 0,56 g/cm³, 0,81 g/cm³ e 0,94g/cm³, para os painéis de 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha, respectivamente, estes valores não foram condizentes com a densidade final dos painéis. Iwakiri et al. (2005) atribuem a redução da densidade final às condições laboratoriais de produção: perdas de material na encoladeira; formação do colchão e carregamento da prensa; retorno em espessura do painel após sua retirada da prensa, com consequente aumento no volume e redução na densidade. Torrell et al. (2013) observaram que, em alguns casos, podem ser encontrados valores finais de densidade ligeiramente superiores à nominal, decorrentes às características da matéria-prima utilizada na confecção dos painéis.

– *Análise estatística: 1º Planejamento Experimental*

As Tabelas 28 e 29 apresentam os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey, para o teor de umidade (TU) e a densidade (D), referentes ao primeiro Planejamento Experimental.

Tabela 28 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade	
	TU	Densidade
%Bor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp	0,352	0,252
Press	0,490	0,865
%Bor×Esp	0,188	0,102
%Bor×Press	0,102	0,086
Esp×Press	0,303	0,983
%Bor×Esp×Press	0,066	0,073

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 29 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
TU (%)	A (10,13)	B (6,81)	C (6,13)	A (7,64)	A (7,72)	A (7,66)	A (7,72)
D (g/cm³)	C (0,53)	B (0,72)	A (0,81)	A (0,70)	A (0,68)	A (0,69)	A (0,68)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Em relação ao 1º Planejamento Experimental, considerando-se as variáveis respostas teor de umidade e densidade, os resultados da ANOVA mostraram que somente a adição de borracha [%Bor] foi influente nestas propriedades (P-valor < 0,05) quando comparados painéis contendo mistura de borracha e painéis com apenas madeira.

Por meio do teste de Tukey, verificou-se que os painéis com adição de borracha na configuração mistura apresentaram menores teores de umidade, pois os valores de TU para 0, 50 e 75% de borracha diferiram-se estatisticamente entre si. Diferença também foi observada entre os valores de densidade dos painéis nos três níveis de borracha, com incrementos na densidade de 38,5% (para tratamentos com 50% de borracha) e 52,8% (para tratamentos com 75% de borracha), em relação à amostra testemunha (0%).

A interação dos fatores no 1º Planejamento Experimental (Tabela 28) não foi significativa para TU e D, apresentando P-valores superiores a 0,05.

– *Análise estatística: 2º Planejamento Experimental*

As Tabelas 30 e 31 apresentam os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey, para o teor de umidade (TU) e a densidade (D), referentes ao segundo Planejamento Experimental.

Tabela 30 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade	
	TU	Densidade
%Bor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp	0,066	0,320
Press	0,101	0,854
%Bor×Esp	0,103	0,201
%Bor×Press	0,082	0,075
Esp×Press	0,122	0,103
%Bor×Esp×Press	<u>0,116</u>	<u>0,221</u>

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 31 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Propriedades	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
TU (%)	A (10,13)	B (6,54)	B (6,53)	A (7,65)	A (7,81)	A (7,87)	A (7,59)
D (g/cm³)	C (0,53)	B (0,68)	A (0,79)	A (0,68)	A (0,66)	A (0,67)	A (0,66)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Considerando-se o 2º Planejamento Experimental, no qual foram comparados painéis com borracha em camada e painéis somente com madeira, os resultados da ANOVA mostraram que somente a adição de borracha [%Bor] foi influente nas propriedades de teor de umidade e densidade (P-valor < 0,05).

O teste de Tukey evidenciou que os painéis com adição de borracha na configuração camada apresentaram menores teores de umidade, porém o teor de borracha neste caso não foi influente, visto a equivalência estatística entre os tratamentos contendo 50 e 75% de borracha. A diferença estatística também foi observada entre os valores de densidade dos painéis nos três níveis de borracha, com incrementos na densidade de 28,3% (para tratamentos com 50%

de borracha) e 49,1% (para tratamentos com 75% de borracha) em relação à amostra testemunha (0%).

A interação dos fatores no 2º Planejamento Experimental (Tabela 30) não foi significativa para TU e D, apresentando P-valores superiores a 0,05.

– *Análise estatística: 3º Planejamento Experimental*

As Tabelas 32 e 33 apresentam os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey, para o teor de umidade (TU) e a densidade (D), referentes ao 3º Planejamento Experimental.

Tabela 32 - Resultados da ANOVA para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental– comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores e Interações	Propriedade	
	TU	Densidade
% Bor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Config	0,482	<u>0,002</u>
Esp	<u>0,003</u>	0,362
Press	0,368	<u>0,001</u>
% Bor×Config	0,176	0,203
% Bor×Esp	0,755	0,275
% Bor×Press	0,120	0,159
Config×Esp	0,580	0,584
Config×Press	<u>0,030</u>	0,749
Esp×Press	0,235	0,819
% Bor×Config×Esp	0,998	0,237
% Bor×Config×Press	0,242	0,295
% Bor×Esp×Press	0,175	0,494
Config×Esp×Press	0,056	0,220
% Bor×Config×Esp×Press	<u>0,415</u>	<u>0,114</u>

*[% Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 33 - Resultados do teste de Tukey para teor de umidade e densidade dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores	Níveis	Propriedade	
		TU (%)	D (g/cm ³)
[%Bor]	50	A (6,67)	B (0,71)
	75	B (6,33)	A (0,80)
[Config]	Camada	A (6,53)	B (0,74)
	Mistura	A (6,47)	A (0,77)
[Esp] (mm)	10	B (6,34)	A (0,75)
	20	A (6,63)	A (0,76)
[Press] (MPa)	2,5	A (6,46)	B (0,74)
	4	A (6,54)	A (0,77)

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Os resultados da ANOVA para o 3º Planejamento Experimental, em que se compararam as configurações de painéis contendo borracha, mostraram que proporção de borracha [%Bor] e espessura [Esp] foram influentes no teor de umidade dos painéis (P-valor < 0,05). Para a densidade, proporção de borracha [%Bor], configuração dos painéis [Conf] e pressão de prensagem [Press] foram fatores influentes.

O teste de Tukey evidenciou que menor porcentagem de borracha (50%) em ambas as configurações de painéis proporcionou maior teor de umidade e menores densidades.

A não equivalência estatística entre os valores de teor de umidade em relação à espessura demonstra maiores TU para painéis de 20 mm. Maiores espessuras de painéis podem influenciar na vaporização da umidade interna do painel. De acordo com THOEMEN; IRLE e SERNEK et al. (2010), durante a prensagem, o calor transferido por convecção pelas placas quentes da prensa provoca a vaporização da umidade, aumentando a pressão de vapor de água. Neste sentido, um gradiente de pressão de vapor é formado através da espessura da placa, fazendo com que haja um fluxo de vapor em direção ao centro do colchão.

Para a densidade, a configuração mistura e pressão de prensagem de 4 MPa proporcionaram maiores valores desta propriedade, conforme diferença estatística entre os níveis destes fatores.

A interação dos fatores [Config×Press], no 3º Planejamento Experimental (Tabela 32), foi significativa para o teor de umidade, apresentando P-valores inferiores a 0,05. A Figura 53 ilustra o gráfico de interação entre fatores considerados significativos pela ANOVA para o TU dos painéis.

Figura 53 - Gráfico de interação entre fatores para TU – 3º Planejamento Experimental: [Config×Press].

O gráfico de interação (Figura 53) permitiu visualizar que, em relação à configuração de borracha nos painéis, são obtidos menores teores de umidade para painéis com borracha em camadas, com pressão de 4 MPa, e para painéis com mistura de borracha, porém com menor pressão de prensagem (2,5 MPa).

4.3.4.2 Inchamento em espessura e absorção de água

As Tabelas 34, 35 e 36 apresentam os valores médios das propriedades de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA), nos períodos de 2 e 24 horas, para os tratamentos referentes aos painéis de composições 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha.

Tabela 34 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira.

Tr		IE-2h (%)	IE-24h (%)	AA-2h (%)	AA-24h (%)
<i>1</i>	$\bar{x}$	4,92	8,39	35,17	66,31
	<i>Cv (%)</i>	15,69	6,46	15,72	9,56
<i>2</i>	$\bar{x}$	2,55	5,56	37,98	66,53
	<i>Cv (%)</i>	17,56	12,4	31,33	20,63
<i>3</i>	$\bar{x}$	3,58	6,39	34,09	63,05
	<i>Cv (%)</i>	7,98	10,02	18,77	22,26
<i>4</i>	$\bar{x}$	2,27	4,90	31,8	62,93
	<i>Cv (%)</i>	14,12	11,62	34,74	13,57

Tabela 35 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira/50% borracha.

Tr		IE-2h (%)	IE-24h (%)	AA-2h (%)	AA-24h (%)
<i>5</i>	$\bar{x}$	3,79	8,15	18,19	37,25
	<i>Cv (%)</i>	24,04	21,88	12,21	3,33
<i>6</i>	$\bar{x}$	2,40	5,78	15,88	32,88
	<i>Cv (%)</i>	21,16	10,74	26,15	14,09
<i>7</i>	$\bar{x}$	2,80	6,16	10,16	27,03
	<i>Cv (%)</i>	42,57	25,78	26,67	15,64
<i>8</i>	$\bar{x}$	1,76	4,35	10,87	29,34
	<i>Cv (%)</i>	20,79	17,3	6,58	9,44
<i>9</i>	$\bar{x}$	3,7	7,11	15,09	35,83
	<i>Cv (%)</i>	22,55	25,39	14,47	14,55
<i>10</i>	$\bar{x}$	7,01	9,52	18,27	37,22
	<i>Cv (%)</i>	15,75	21,64	6,27	6,04
<i>11</i>	$\bar{x}$	2,76	5,19	17,00	40,08
	<i>Cv (%)</i>	4,6	10,78	20,54	14,52
<i>12</i>	$\bar{x}$	2,12	4,19	19,37	32,44
	<i>Cv (%)</i>	23,54	16,29	25,92	15,28

Tabela 36 - Valores médios de IE e AA, em 2 e 24 horas - painéis 100% madeira/75% borracha.

	Tr	IE-2h (%)	IE-24h (%)	AA-2h (%)	AA-24h (%)
13	$\bar{x}$	4,05	6,68	8,94	23,32
	Cv (%)	31,35	27,42	17,85	26,55
14	$\bar{x}$	1,79	4,60	8,41	19,79
	Cv (%)	19,65	8,13	10,33	9,15
15	$\bar{x}$	3,82	6,43	9,53	24,05
	Cv (%)	22,14	27,88	28,65	23,33
16	$\bar{x}$	2,37	4,80	9,47	21,55
	Cv (%)	37,2	17,61	21,38	13,52
17	$\bar{x}$	3,08	6,34	7,72	17,98
	Cv (%)	61,31	25,03	27,75	19,14
18	$\bar{x}$	2,44	5,47	15,44	29,83
	Cv (%)	25,38	15,81	22,99	10,59
19	$\bar{x}$	2,84	6,05	6,38	17,84
	Cv (%)	20,05	29,75	29,03	26,66
20	$\bar{x}$	5,44	7,66	11,76	26,39
	Cv (%)	29,16	27,98	30,98	27,06

Observou-se para IE - 2 horas, faixas de valores de 2,27 a 4,92% para tratamentos 100% madeira, de 1,76 a 7,01% para painéis 100% madeira/50% borracha, e de 1,79 a 5,44% para painéis 100% madeira/75% borracha. Os tratamentos obtidos neste estudo obedeceram em sua totalidade ao requisito máximo permitido de 8% para IE em 2 horas, conforme a ABNT NBR 14810-2 (2006).

Para IE - 24 horas, foram obtidos valores entre 4,90 a 8,39% para painéis 100% madeira, de 4,19 a 9,52% para painéis 100% madeira/50% borracha, e de 4,60 a 7,66% para painéis 100% madeira/75% borracha. Os painéis de todos os tratamentos estiveram condizentes ao máximo permitido de 14%, definido pela EN 312 (2003) para painéis não estruturais de uso em condições úmidas. Em relação ao requisito da norma ANSI A208.1 (1999) para IE-24 horas máximo de 8%, todos os tratamentos dos painéis 100% madeira/75% borracha atenderam ao requisito.

Em relação à absorção de água em 2 e 24 horas, o desempenho dos painéis foi diretamente proporcional à adição de maiores teores de borracha na composição dos painéis.

Para AA- 2 horas, os painéis (Tr 1 a 4) apresentaram valores entre 31,80 e 37,98%. Em painéis contendo borracha, AA-2 horas teve desempenho superior em relação aqueles sem

a adição deste insumo, com valores entre 10,16 e 19,37% para 100% madeira/50% borracha (Tr 5 a 12) e resultados entre 7,72 e 15,44% para 100% madeira/75% borracha (Tr 13 a 20).

Para AA-24 horas, os valores para as composições contendo 0%, 50% e 75% de borracha foram em torno de 65%, 34% e 23%, respectivamente.

Macedo (2008) produziu compósitos de madeira com adição de borracha em proporções de 0, 15, 30 e 45% observando tendência semelhante. Desempenhos superiores de absorção de água foram obtidos para painéis contendo maiores teores de borracha. Os valores médios de AA em 2 horas foram de 72,7% para painéis sem adição de borracha e de 64,6% para painéis com 45% de borracha. Em 24 horas, a AA foi de 80,8% para painéis sem adição de borracha e de 67,9% para painéis com 45% de borracha.

Em geral, os tratamentos 8 e 14, os quais apresentam adição de borracha, resultaram nos melhores desempenhos para as propriedades de IE e AA, em ambos os períodos. A presença da borracha resulta em maior resistência a água devido à sua considerável característica hidrofóbica (SONG e HWANG, 2001).

Além da presença da borracha, a madeira tratada e a resina poliuretana também conferem aos painéis características de maior resistência à água.

Os valores de IE e AA estão condizentes com trabalhos envolvendo o emprego de madeira tratada. Os painéis deste trabalho, dos tratamentos Tr 2, 3 e 4, contendo apenas madeira de *Pinus* sp. tratado com CCB, apresentam desempenho superior à estudo análogo. Bertolini et al. (2014) obteve valores de IE em 2 e 24 horas de 4,09% e 8,65% para painéis produzidos com *Pinus* sp. tratado com CCA (arseniato de cobre cromatado) e resina poliuretana à base de óleo de mamona.

Em relação a trabalhos disponíveis na literatura, envolvendo painéis produzidos com resina poliuretana à base de mamona, os valores aqui obtidos assemelham-se aos de: Varanda et al. (2013) com IE em 2 horas de 4,3% para painéis de *Eucalyptus grandis*; Sartori et al. (2012) com IE – 2 horas e 24 horas de 5,6% e 20% para painéis de bagaço de cana-de-açúcar; Fiorelli et al. (2012) com AA – 24 horas de 36,59% para painéis de partículas de fibra de coco; e Paes et al. (2011) com IE - 2 e 24 horas de 9,71, 16,91% e AA – 2 e 24 horas de 20,73% e 43,70%, para painéis de partículas de *Pinus elliottii*.

– *Análise estatística: 1º Planejamento Experimental*

As Tabelas 37 e 38 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) - 2 e 24 horas, referente ao primeiro Planejamento Experimental.

Tabela 37 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade			
	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h
%Bor	0,085	0,877	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp	0,462	0,248	0,124	0,187
Press	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	0,268	0,309
%Bor×Esp	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	0,183	0,109
%Bor×Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,288	0,770
Esp×Press	0,789	0,826	0,324	0,240
%Bor×Esp×Press	0,253	0,105	0,816	0,601

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 38 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Propriedades	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
IE-2h (%)	A (3,33)	A (3,89)	A (3,45)	A (3,48)	A (3,64)	A (3,95)	B (3,17)
IE-24h (%)	A (6,31)	A (6,51)	A (6,38)	A (6,58)	A (6,22)	A (7,07)	B (5,73)
AA-2h (%)	A (34,76)	B (17,44)	C (10,33)	A (19,24)	A (22,44)	A (21,61)	A (20,07)
AA-24h (%)	A (64,71)	B (36,39)	C (23,01)	A (40,18)	A (42,56)	A (42,28)	A (40,45)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Em relação ao 1º Planejamento Experimental, quando comparados painéis com mistura de borracha e painéis contendo somente madeira, os resultados da ANOVA mostraram que apenas a pressão de prensagem [Press] foi influente na propriedade de

inchamento em espessura, em 2 e 24 horas. Para a absorção de água, nos períodos de 2 e 24 horas, o único fator influente foi a adição de borracha [%Bor].

Os resultados obtidos no teste de Tukey demonstraram que, para IE em 2 e 24 horas, a pressão de 4 MPa resultou em melhor desempenho, ou seja, menores porcentagens de inchamento. Na absorção de água, os valores obtidos para os três níveis de adição de borracha apresentaram diferença estatística entre si, sobressaindo-se em desempenho os painéis contendo 75% de borracha.

Os fatores influentes nas propriedades de IE e AA podem ser relacionados à menor presença de vazios nos painéis e a capacidade do material borracha de reter água, tendências também observadas por Macedo (2008) para compósitos madeira-borracha.

A interação dos fatores no 1º Planejamento Experimental (Tabela 37) foi significativa para IE - 2 e 24 horas, nas interações [%Bor×Esp] e [%Bor×Press], apresentando P-valores superiores a 0,05. As Figuras 54 e 55 ilustram os gráficos de interação, para a propriedade de inchamento em espessura – 2 e 24 horas.

Figura 54 – Gráficos de interação entre fatores para IE – 2 horas - 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).

Figura 55 – Gráficos de interação entre fatores para IE – 24 horas – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).

Para IE em 2 e 24 horas, os gráficos da interação [%Bor×Esp], Figuras 54a e 55a, mostram que a adição de borracha nos dois níveis (50% e 75%) resultam em desempenho superior quando aplicados em painéis de menor espessura (10 mm). Já painéis sem adição de borracha (0%), apresentam melhor desempenho, ou seja, menores porcentagens de IE em 2 e 24 horas, quando fabricados em maior espessura (20 mm).

Para a interação [%Bor×Press], Figuras 54b e 55b, a adição de menores proporções de borracha (0 e 50%) proporciona desempenho superior em IE para painéis de pressão de 4 MPa. Para a proporção de 75% de borracha, menores porcentagens de IE são obtidas com painéis de menor pressão de prensagem (2,5 MPa).

– Análise estatística: 2º Planejamento Experimental

As Tabelas 39 e 40 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) - 2 e 24 horas, referente ao segundo Planejamento Experimental.

Tabela 39 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade			
	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h
%Bor	0,093	0,107	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,834	0,438
Press	0,079	<u>0,000</u>	0,122	0,081
%Bor×Esp	0,251	0,885	0,948	0,759
%Bor×Press	<u>0,041</u>	<u>0,033</u>	0,083	0,158
Esp×Press	0,092	0,149	0,842	0,474
%Bor×Esp×Press	0,711	0,760	0,448	0,675

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 40 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
IE-2h (%)	A (3,33)	A (2,69)	A (3,00)	A (3,82)	B (2,19)	A (2,77)	A (2,25)
IE-24h (%)	A (6,31)	A (6,11)	A (5,62)	A (7,03)	B (4,98)	A (6,53)	B (5,51)
AA-2h (%)	A (34,76)	B (13,77)	C (9,09)	A (19,35)	A (19,07)	A (20,76)	A (17,65)
AA-24h (%)	A (64,71)	B (31,62)	C (22,18)	A (40,17)	A (38,84)	A (41,01)	A (37,99)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 2º Planejamento Experimental, ao se compararem painéis com borracha em camada e painéis contendo somente madeira, os resultados da ANOVA mostraram que o fator espessura [Esp] foi influente no inchamento em espessura, 2 e 24 horas, e o fator pressão de prensagem [Press] foi influente em IE 24 horas. Para a absorção de água, 2 e 24 horas, o fator influente foi a adição de borracha [%Bor].

Os resultados obtidos no teste de Tukey demonstraram que, para IE no período de 2 horas, painéis de 20 mm resultaram em melhor desempenho. Para IE em 24 horas, tanto painéis de maior espessura quanto com maior pressão de prensagem (4 MPa) levaram a

menores porcentagens de inchamento. Em relação à absorção de água, 2 e 24 horas, os valores obtidos para os três níveis de adição de borracha apresentaram diferença estatística, com destaque ao desempenho dos painéis com 75% de borracha.

A interação dos fatores no 2º Planejamento Experimental (Tabela 39) foi significativa apenas para IE - 2 e 24 horas. Na interação [%Bor×Press], os P-valores apresentaram-se superiores a 0,05. As Figuras 56 e 57 ilustram os gráficos de interação, para a propriedade de inchamento em espessura – 2 e 24 horas.

Figura 56 – Gráfico de interação entre fatores para IE – 2 horas – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].

Figura 57 – Gráfico de interação entre fatores para IE – 24 horas – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].

Para IE – 2 e 24 horas, as Figuras 56 e 57 mostram que para painéis com borracha em camada, com 75% de borracha e pressão de prensagem de 2,5 MPa, resultam em desempenho superior. Quando empregados 50% de borracha ou na ausência da mesma (0%), a pressão de prensagem de 4 MPa promove melhor desempenho. Este comportamento pode ser relacionado aos vazios internos no painel, que poderá ser reduzido tanto pela maior proporção de borracha quanto pelas maiores pressões de prensagem.

– *Análise estatística: 3º Planejamento Experimental*

As Tabelas 41 e 42 apresentam os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) - 2 e 24 horas, referente ao terceiro Planejamento Experimental.

Tabela 41 - Resultados da ANOVA para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores e Interações	Propriedade			
	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h
%Bor	0,747	0,304	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Config	<u>0,000</u>	0,055	<u>0,000</u>	0,303
Esp	0,341	0,097	<u>0,000</u>	0,406
Press	0,207	<u>0,000</u>	0,074	0,237
%Bor×Config	<u>0,035</u>	0,542	0,075	0,133
%Bor×Esp	0,210	0,937	0,061	0,181
%Bor×Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,144	0,073
Config×Esp	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,056
Config×Press	0,256	0,431	0,081	0,326
Esp×Press	0,784	0,974	0,940	0,525
%Bor×Config×Esp	0,712	0,629	0,152	0,318
%Bor×Config×Press	0,207	0,077	0,275	0,110
%Bor×Esp×Press	0,123	0,105	0,370	0,990
Config×Esp×Press	0,236	0,412	0,145	0,307
%Bor×Config×Esp×Press	0,086	0,113	0,818	0,121

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 42 - Resultados do teste de Tukey para IE e AA - 2 e 24 horas dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores	Níveis	Propriedades			
		IE-2h (%)	IE-24h (%)	AA-2h (%)	AA-24h (%)
%Bor	50	A (3,29)	A (6,31)	A (15,60)	A (34,01)
	75	A (3,23)	A (6,02)	B (9,61)	B (22,59)
Config	Cam	B (2,85)	A (6,44)	B (11,43)	A (26,90)
	Mist	A (3,67)	A (5,87)	A (13,88)	A (29,7)
Esp	10	A (3,36)	A (6,51)	B (11,63)	A (27,92)
	20	A (3,17)	A (5,80)	A (13,69)	A (28,68)
Press	2,5	A (3,53)	A (6,71)	A (13,49)	A (29,26)
	4	A (2,99)	B (5,60)	A (11,82)	A (27,34)

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 3º Planejamento Experimental, comparando-se os painéis contendo borracha, observa-se que para o IE, o fator configuração [Config] exerce influência nesta propriedade para o período de 2 horas e o fator [Press] para IE em 24 horas. Para a absorção de água, o fator teor de borracha [%Bor] influencia nos períodos de 2 e 24 horas e os fatores configuração [Config] e espessura [Esp] apenas na AA em 2 horas.

Pelo teste de Tukey verificou-se que, no inchamento em espessura em 2 horas, a configuração camada proporcionou desempenho superior e, no período de 24 horas, melhores desempenhos foram alcançados com maior pressão de prensagem. Na absorção de água, 2 e 24 horas, a diferença estatística entre os níveis do fator [%Bor] demonstrou que a proporção de 75% deste insumo resulta em maiores ganhos. Para AA 2 horas, a [Config] camada e [Esp] de 10 mm levaram a melhor desempenho.

A interação dos fatores no 3º Planejamento Experimental (Tabela 41) foi significativa (P-valores superiores a 0,05) para IE em 2 e 24 horas, nas interações [%Bor×Press] e [Config×Esp] e para IE em 2 horas na interação [%Bor×Config]. Para AA em 2 horas, [Config×Esp]

representou a interação entre fatores com significância. As Figuras 58, 59 e 60 ilustram os gráficos de interação.

Figura 58 - Gráficos de interação entre fatores para o IE-2h – 3º Planejamento Experimental:

[%Bor × Config] (a), [%Bor × Press] (b) e [Config × Esp] (c).

Figura 59 - Gráficos de interação entre fatores para o IE-24h – 3º Planejamento Experimental:

[%Bor × Press] (a) e [Config × Esp] (b).

Figura 60 - Gráfico de interação entre fatores para AA-2h – 3º Planejamento Experimental: [Config×Esp].

O gráfico de interação [%Bor×Config], para a propriedade de IE- 2 horas, (Figura 58a) mostrou que, para ambos os teores de borracha, a configuração em camada apresenta maior desempenho.

Na interação [%Bor×Press], para as propriedades de IE – 2 horas (Figura 58b) e IE – 24 horas (Figura 59a), observou-se que a pressão de prensagem é inversamente proporcional ao teor de borracha, em painéis com comportamento superior.

Para a interação [Config×Esp], para as propriedades de IE - 2 horas (Figura 58c), IE - 24 horas (Figura 59b) e AA – 2 horas (Figura 60), painéis de 10 mm apresentam melhor performance na configuração mistura e painéis de 20 mm na configuração camada.

4.3.4.3 Módulo de ruptura e módulo de elasticidade

As Tabelas 43, 44 e 45 apresentam os valores médios das propriedades de módulo de ruptura (MOR) e de módulo de elasticidade (MOE), para os tratamentos referentes aos painéis de composições 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha.

Tabela 43 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira.

Tr		MOR (MPa)	MOE (MPa)
<i>1</i>	$\bar{x}$	4,1	450
	<i>Cv (%)</i>	40,25	46,79
<i>2</i>	$\bar{x}$	6,1	688
	<i>Cv (%)</i>	19,36	11,84
<i>3</i>	$\bar{x}$	6,6	759
	<i>Cv (%)</i>	17,63	16,89
<i>4</i>	$\bar{x}$	4,8	539
	<i>Cv (%)</i>	6,74	5,59

Tabela 44 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira/50% borracha.

Tr		MOR (MPa)	MOE (MPa)
<i>5</i>	$\bar{x}$	5,2	364
	<i>Cv (%)</i>	29,39	27,71
<i>6</i>	$\bar{x}$	7,4	449
	<i>Cv (%)</i>	16,31	14,09
<i>7</i>	$\bar{x}$	7,9	527
	<i>Cv (%)</i>	9,66	15,01
<i>8</i>	$\bar{x}$	6,3	415
	<i>Cv (%)</i>	17,71	23,59
<i>9</i>	$\bar{x}$	4,4	425
	<i>Cv (%)</i>	21,59	16,8
<i>10</i>	$\bar{x}$	6,1	462
	<i>Cv (%)</i>	10,5	8,25
<i>11</i>	$\bar{x}$	7	592
	<i>Cv (%)</i>	22,6	33,57
<i>12</i>	$\bar{x}$	7,1	508
	<i>Cv (%)</i>	16,88	20,42

Tabela 45 - Valores médios de MOR e MOE - painéis 100% madeira/75% borracha.

Tr	Estat.	MOR (MPa)	MOE (MPa)
13	$\bar{x}$	9,7	498
	C_v (%)	12,31	20,63
14	$\bar{x}$	6,8	381
	C_v (%)	14,17	17,02
15	$\bar{x}$	7,2	421
	C_v (%)	18,65	29,05
16	$\bar{x}$	6	317
	C_v (%)	8,26	9,36
17	$\bar{x}$	4,1	330
	C_v (%)	29,66	27,76
18	$\bar{x}$	5,7	347
	C_v (%)	16,37	21,9
19	$\bar{x}$	7,9	635
	C_v (%)	24,39	15,84
20	$\bar{x}$	7,6	519
	C_v (%)	10,96	8,51

Observou-se para o MOR que os 20 tratamentos apresentaram valores médios próximos. Para a composição 100% madeira, esta propriedade variou de 4,1 a 6,6 MPa. Nas composições com adição de borracha, os tratamentos 100% madeira/50% borracha tiveram MOR compreendidos entre 4,4 e 7,9 MPa e os tratamentos 100% madeira/75% borracha apresentaram valores entre 4,1 e 9,7 MPa.

Para o módulo de elasticidade, os valores obtidos para os 20 tratamentos também se apresentaram próximos. Painéis da composição 100% madeira resultaram em MOE entre 450 e 759 MPa, enquanto painéis com borracha apresentaram, para 100% madeira/50% borracha, valores de MOE entre 364 e 592 MPa e, para 100% madeira/75% borracha, de 317 a 635 MPa.

A norma ANSI A208.1 (1999), estabelece para a classificação LD-1, requisitos mínimos de 3 MPa (MOR) e 550 MPa (MOE). Os painéis de baixa densidade, referentes à composição 100% madeira, apresentam todos os tratamentos (Tr 1, 2, 3 e 4) em conformidade ao estabelecido para o MOR. Para o MOE, com exceção de Tr 1 e 4, os demais tratamentos atenderam ao requisito citado.

Os painéis contendo borracha, nas duas proporções (50 % e 75 %) não atingiram os requisitos sugeridos para suas densidades (média e alta), de acordo com a ABNT 14810-2: 2006 e ANSI A208.1 (1999).

Neste trabalho, apesar dos valores de MOR e MOE, de tratamentos contendo borracha, não atingirem as normas para painéis de densidades específicas, cabe ressaltar que nenhuma delas faz menção à utilização destes painéis em produtos termoacústicos. Geralmente, as normas para painéis de partículas estabelecem usos industriais, como fabricação de móveis e embalagens, além da aplicação na construção civil, como núcleos de portas e pisos (ANSI A208.1: 1999).

Para obtenção das características intrínsecas à composição e morfologia dos painéis termoacústicos, a resistência mecânica muitas vezes é baixa e pouco requerida, dependendo do tipo de aplicação dos painéis.

As normas para painéis derivados da madeira com propriedades térmicas e acústicas referem-se, principalmente, a painéis de fibras de celulose, como a norma ANSI A194.1 (1973) “*Cellulosic fiber insulation board*” e a IS 3348 (1965) “*Specification for fibre insulation board*”. A norma IS 3308 (1981) “*Specification for wood wool building slabs*” refere-se à painéis de lã de madeira (partículas finas e longas). Em geral, as normas envolvem painéis de baixa densidade.

Apenas a norma ANSI A194.1 (1973) aborda o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade, embora enfatize painéis de densidade inferior a 0,50 g/cm³. Para placas isolantes destinadas à pavimentos (coberturas), é solicitado aproximadamente 1,55 MPa para o MOR. O MOE, propriedade requerida somente para este produto, é de 276 MPa. Considerando-se estes requisitos, o tratamento Tr 4 deste estudo, com densidade de 0,45 g/cm³, apresenta desempenho bem superior com MOR de 4,8 MPa e MOE de 539 MPa.

Observando-se o exposto sobre a abordagem das normas, acredita-se que haja carência de requisitos para painéis termoacústicos de outras faixas de densidade, além de diferentes configurações, como os painéis de partículas.

Os painéis deste trabalho mostram-se coerentes com estudos semelhantes da literatura.

Ghofrani e Rabiei (2008) produziram painéis com emprego da madeira Poplar (*Populus nigra*) e adições de 50 e 75% de borracha de pneu, utilizando adesivo isocianato PMDI. Os autores obtiveram para painéis contendo 50% de borracha valores de MOR de 1,69 MPa e MOE de 120,47 MPa. Na composição contendo 75% de borracha, os painéis produzidos por Ghofrani e Rabiei (2008) resultaram em MOR de 5,98 MPa e MOE de 643,16 MPa. Comparados os resultados deste trabalho com a literatura citada, todos os tratamentos com 50% de borracha e os tratamentos Tr 13, 14, 15, 16, 19 e 20 apresentam-se superiores em relação ao MOR.

Jun et al. (2008) abordaram a produção de painéis com razão em peso entre madeira (*Larix gmelini*) e resíduos de borracha de pneu de 60:40, utilizando resina ureia-formaldeído e adesivo PMDI, respectivamente. Os painéis foram produzidos com densidade 0,8 g/cm³ e resultaram em MOR de 8,1 MPa e MOE de 855 MPa. A maior temperatura de prensagem (160°C) e pressões de 4 a 8 MPa, utilizadas por Jun et. al. (2008) na produção dos painéis, podem ter ocasionado a fusão da borracha e incorporação com a madeira, o que proporcionou melhor desempenho. Xu e Li (2012) observaram que maiores temperaturas de prensagem promoveram aumento das propriedades mecânicas de MOR e MOE para compósitos contendo madeira e borracha, adesivos ureia-formaldeído e PMDI.

No trabalho em questão, o emprego do adesivo poliuretano de mamona, de menor temperatura de cura, foi determinado também pela preferência de uma estrutura mais porosa, com mínima fusão da borracha, devido à aplicação dos painéis para isolamento térmico e absorção sonora.

– *Análise estatística: 1º Planejamento Experimental*

As Tabelas 46 e 47 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), referente ao primeiro Planejamento Experimental.

Tabela 46 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedades	
	MOR	MOE
%Bor	<u>0,019</u>	<u>0,000</u>
Esp	0,067	0,425
Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%Bor×Esp	0,583	0,664
%Bor×Press	<u>0,011</u>	<u>0,039</u>
Esp×Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%Bor×Esp×Press	0,225	0,117

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 47 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
MOR (MPa)	B (5,4)	A (6,1)	A (6,3)	A (5,7)	A (6,2)	B (5,1)	A (6,8)
MOE (MPa)	A (609)	B (497)	B (458)	A (532)	A (510)	B (450)	A (592)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 1º Planejamento Experimental, avaliando-se painéis com mistura de borracha em relação àqueles painéis contendo apenas madeira, os resultados obtidos pela ANOVA mostraram que os fatores [%Bor] e [Press] foram influentes nas propriedades de MOR e MOE, com base em P-valores < 0,05.

O teste de Tukey evidenciou que os valores de MOR são superiores para painéis contendo borracha, independente da proporção adotada (50 ou 75%) comparando-os a painéis contendo apenas madeira. No MOE este comportamento é inverso: melhor desempenho é obtido para painéis sem a adição de borracha. A maior pressão de prensagem (4 MPa) adotada para produção dos painéis também proporcionou comportamento superior para MOR e MOE.

Quanto à interação dos fatores, 1º Planejamento Experimental (Tabela 46), foram significativas para o MOR e MOE: [%Bor×Press] e [Esp×Press]. As Figuras 61 e 62 ilustram os gráficos de interação.

Figura 61 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR -1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press] (a) e [Esp×Press] (b).

Figura 62 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE -1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press] (a) e [%Esp×Press] (b).

Para a interação [%Bor×Press], a Figura 61a mostrou que o MOR é superior para tratamentos contendo 75% de borracha e pressão de prensagem de 4 MPa. Para o MOE, a Figura 62a destacou melhor desempenho para painéis contendo apenas madeira e maior pressão de prensagem. Song e Hwang (2001) observaram comportamento semelhante em compósitos madeira-borracha, com menores valores de MOE na medida em que se aumentavam as proporções de borracha (0, 25, 50 e 75%).

Em relação à interação [%Esp×Press], o comportamento é semelhante para o MOR e para o MOE (Figuras 61b e 62b). Painéis de 20 mm apresentam melhor desempenho quando produzidos com menor pressão de prensagem. Já para as amostras de menor espessura (10 mm), os resultados destas propriedades são superiores quando utilizada maior pressão de prensagem (4 MPa).

– Análise estatística: 2º Planejamento Experimental

As Tabelas 48 e 49 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), referente ao 2º Planejamento Experimental.

Tabela 48 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 2º Planejamento

Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedades	
	MOR	MOE
%Bor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp	0,182	0,121
Press	0,798	0,309
%Bor×Esp	<u>0,001</u>	<u>0,014</u>
%Bor×Press	<u>0,000</u>	<u>0,027</u>
Esp×Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%Bor×Esp×Press	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 49 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 2º Planejamento

Experimental- painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Propriedades	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
MOR (MPa)	B (5,4)	A (6,7)	A (7,4)	A (6,8)	A (6,2)	A (6,5)	A (6,5)
MOE (MPa)	A (609)	B (439)	B (404)	A (503)	A (465)	A (471)	A (496)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Para o 2º Planejamento Experimental, considerando-se os painéis com borracha em camada em relação aqueles contendo apenas madeira, os resultados da ANOVA demonstraram que apenas o fator [%Bor] foi influente nas propriedades de MOR e MOE.

O teste de Tukey mostrou que o MOR é superior para os painéis contendo borracha em camada, independentemente do nível (50 ou 75%), quando comparados a painéis sem adição de borracha. Para o MOE, os painéis constituídos apenas por partículas de madeira apresentaram melhor desempenho em relação aqueles contendo borracha. Este comportamento mecânico de compósitos com adição de borracha também foi observado por outros autores como Macedo (2008) e Giacobbe (2008). Isto se deve ao fato da borracha possuir um baixo módulo de elasticidade, devido à alta capacidade de deformação mesmo com baixas tensões (GUERREIRO, 2003).

Em termos de interação dos fatores (Tabela 48), os resultados da ANOVA mostraram a influência de todas as interações, que pode ser representada por [%Bor×Esp×Press] no MOR e MOE dos painéis. As Figuras 63 e 64 ilustram os gráficos de interação.

Figura 63 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp×Press].

O gráfico de interação (Figura 63) para o MOR, para o 2º Planejamento Experimental mostrou que, comparando-se painéis com apenas madeira e painéis contendo borracha em camada, apresentou melhor desempenho o tratamento com: 100% madeira/75% borracha, espessura 10 mm e pressão 2,5 MPa.

Figura 64 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp×Press].

O gráfico de interação (Figura 64) para o MOE, para o 2º Planejamento Experimental mostrou que, comparando-se painéis com apenas madeira e painéis contendo borracha em camada, apresentou maior desempenho tratamento com: a) 100% madeira, espessura de 10 mm e pressão de prensagem de 4 MPa.

– *Análise estatística: 3º Planejamento Experimental*

As Tabelas 50 e 51 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para as propriedades de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), referente ao 3º Planejamento Experimental.

Tabela 50 - Resultados da ANOVA para MOR e MOE dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores e Interações	Propriedades	
	MOR	MOE
%Bor	0,051	0,061
Config	<u>0,001</u>	<u>0,005</u>
Esp	0,741	0,083
Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
%Bor×Config	0,265	0,917
%Bor×Esp	<u>0,010</u>	0,115
%Bor×Press	0,134	0,967
Config×Esp	0,071	0,508
Config×Press	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Esp×Press	0,055	<u>0,006</u>
%Bor×Config×Esp	0,093	0,366
%Bor×Config×Press	0,128	0,101
%Bor×Esp×Press	0,121	0,206
Config×Esp×Press	0,511	0,647
%Bor×Config×Esp×Press	0,204	0,152

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 51 - Resultados do teste de Tukey para MOR e MOE dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores	Níveis	MOR (MPa)	MOE (MPa)
%Bor	50	A (6,4)	A (468)
	75	A (6,89)	A (431)
Config	Cam	A (7,1)	B (422)
	Mist	B (6,2)	A (477)
Esp	10	A (6,7)	A (474)
	20	A (6,6)	A (425)
Press	2,5	B (6,2)	B (407)
	4	A (7,1)	A (492)

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Considerando-se o 3º Planejamento Experimental, comparando-se as duas configurações de borracha nos painéis (camada e mistura), os resultados da ANOVA demonstraram que os fatores [Config] e [Press] foram influentes para as propriedades de MOR e MOE.

Para o teste de Tukey, observou-se que valores superiores de MOR são obtidos com a configuração camada e maior pressão de prensagem (4 MPa). Para o MOE, o desempenho foi superior para a configuração mistura e pressão de 4 MPa.

Quanto à interação dos fatores (Tabela 50), os resultados da ANOVA mostraram a influência das interações [%Bor×Esp] e [Config×Press] para o MOR, e [Config×Press] e [Esp×Press] para o MOE. As Figuras 65 e 66 ilustram os gráficos de interação.

Figura 65 - Gráficos de interação entre fatores para o MOR – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [Config×Press] (b).

Para o MOR, a Figura 65a mostra que na interação [%Bor×Esp], os painéis contendo 75% de borracha e 10 mm de espessura apresentaram desempenho superior. A Figura 65b, referente à interação [Config×Press], mostra que maiores valores desta propriedade foram obtidos para a configuração mistura e pressão de prensagem igual a 4 MPa.

Figura 66 - Gráficos de interação entre fatores para o MOE – 3º Planejamento Experimental: [Config×Press] (a) e [Esp×Press] (b).

Para o MOE, o gráfico da interação [Config×Press], Figura 66a, mostra que valores superiores são obtidos para a configuração mistura e pressão de 4 MPa. Na Figura 66b, o gráfico da interação [Esp×Press] permitiu visualizar o melhor desempenho para painéis de 10 mm e pressão de 4 MPa.

4.3.4.4 Resistência à tração perpendicular às faces

As Tabelas 52, 53 e 54 apresentam os valores médios da resistência à tração perpendicular (RTP), dos tratamentos referentes aos painéis com 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha.

Tabela 52 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira.

Tr		RTP (MPa)
<i>1</i>	$\bar{x}$	1,46
	<i>Cv (%)</i>	36,61
<i>2</i>	$\bar{x}$	1,25
	<i>Cv (%)</i>	25,91
<i>3</i>	$\bar{x}$	1,34
	<i>Cv (%)</i>	17,06
<i>4</i>	$\bar{x}$	1,04
	<i>Cv (%)</i>	16,83

Tabela 53 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira/50%

Tr		RTP (MPa)
<i>5</i>	$\bar{x}$	1,09
	<i>Cv (%)</i>	39,43
<i>6</i>	$\bar{x}$	0,65
	<i>Cv (%)</i>	18,02
<i>7</i>	$\bar{x}$	1,53
	<i>Cv (%)</i>	18,03
<i>8</i>	$\bar{x}$	0,9
	<i>Cv (%)</i>	14,25
<i>9</i>	$\bar{x}$	1,3
	<i>Cv (%)</i>	16,08
<i>10</i>	$\bar{x}$	1
	<i>Cv (%)</i>	24,18
<i>11</i>	$\bar{x}$	1,63
	<i>Cv (%)</i>	16,95
<i>12</i>	$\bar{x}$	1,68
	<i>Cv (%)</i>	9,98

Tabela 54 - Valores médios de resistência à tração perpendicular (RTP) - painéis 100% madeira/75% borracha.

Tr		RTP (MPa)
13	$\bar{x}$	1,07
	Cv (%)	13,43
14	$\bar{x}$	0,76
	Cv (%)	36,81
15	$\bar{x}$	0,94
	Cv (%)	18,36
16	$\bar{x}$	0,37
	Cv (%)	15,2
17	$\bar{x}$	0,77
	Cv (%)	28,6
18	$\bar{x}$	0,91
	Cv (%)	29,3
19	$\bar{x}$	1,22
	Cv (%)	28,84
20	$\bar{x}$	0,98
	Cv (%)	17,73

Para a resistência à tração perpendicular dos painéis, foram observados valores médios compreendidos entre 1,04 e 1,46 MPa para tratamentos 100% madeira, de 0,65 a 1,68 MPa para composições 100% madeira/50% borracha e de 0,37 a 1,22 MPa para as composições 100% madeira/75% borracha.

Em comparação com as principais normas de painéis de partículas, os painéis de 19 tratamentos apresentaram-se em conformidade, exceto para o tratamento Tr 16.

Painéis de baixa densidade 100% madeira (Tr 1, 2, 3 e 4) mostraram valores bastante superiores ao requisito mínimo de 0,1 MPa (ANSI A208.1: 1999).

As amostras de média densidade, referentes a 100% madeira/50% borracha (Tr 5 a 12) e à 100% madeira/75% borracha (Tr 13, 14, 18 e 19), apresentaram-se em conformidade com o mínimo de 0,4 MPa (ABNT NBR 14810-2: 2006; ANSI A208.1: 1999) e de 0,48 MPa (CS 236: 1966).

Os painéis de alta densidade (Tr 15, 17 e 20), referentes a 100% madeira/75% borracha, estiveram de acordo com o requisito de 0,9 MPa (ANSI A208.1, 1999), exceto o tratamento Tr 17.

Os tratamentos em geral, exceto Tr 17, atenderam aos requisitos baseados em espessura do painel, referente à EN 312 (2003), a qual determina mínimo de 0,35 MPa (6 a 13 mm) e de 0,40 MPa (13 a 20 mm). Os requisitos citados da norma EN são indicados para painéis P3 - não estruturais e uso em condições úmidas.

Os valores encontrados neste trabalho apresentaram-se coerentes com estudos para os painéis de partículas de madeira: Paes et. al. (2011) com painéis de *Pinus elliottii* e resina poliuretana à base de óleo de mamona (1,41 MPa); Kowaluk et al. (2013) com painéis *Pinus sylvestris* L. e resina ureia-formaldeído (0,30 MPa); e Fiorelli et al. (2014) com painéis de partículas de *Pinus* spp. e resina poliuretana de mamona (0,54 MPa). Os resultados obtidos para painéis contendo borracha neste trabalho se assemelham aos obtidos por: Ghofrani e Rabiei (2008) com painéis de madeira Poplar (*Populus nigra*), borracha de pneu reciclada e resina PMDI (0,5 MPa); Macedo (2008) com partículas de *Pinus taeda* e borracha de pneu ($\approx 0,24$ MPa); Jun et. al. (2008) com painéis de partículas de Larch (*Larix gmelini*), resíduos de borracha de pneu e resinas ureia-formaldeído e PMDI (0,52 MPa); e Xu e Li (2012) para painéis com partículas de Poplar (*Populus* spp.) e pó de borracha de pneu inservível (1,41 MPa).

A propriedade de tração perpendicular às faces é também chamada de adesão interna, pois determina a resistência da interação entre as partículas e o adesivo. A Figura 67 apresenta o tipo de ruptura ocorrida neste ensaio, para cada configuração de painel.

Figura 67 – Rompimento dos corpos de prova na tração perpendicular às faces: a) painel contendo apenas madeira; b) painel com borracha em camada; c) painel com mistura de borracha.

Observa-se que o rompimento ocorre no centro dos corpos de prova, conforme esperado para esta análise. Nos painéis com adição de borracha em camada (Figura 67b), a ruptura se propaga na região da borracha, o que pode estar relacionado à interação mais

eficiente entre madeira e adesivo. Song e Hwang (2001) citam que os adesivos MDI possuem elevada capacidade de adesão em compósitos de madeira e borracha, devido à alta reatividade com grupos hidroxilas e grupos sulfônicos. No entanto, a ligação pode ser afetada por matérias-primas de área superficial superior e, com isto, menor teor de adesivo por unidade de área.

Nos painéis com mistura de borracha (Figura 67c) a ruptura se propaga nas regiões de interface entre a madeira e os grânulos de borracha. Segundo Garcia et al. (2007) este comportamento pode ser motivado pela baixa compatibilidade entre matriz e enchimento, resultando em falhas interfaciais, conforme observado para compósitos de borracha de pneu e casca de arroz.

– *Análise estatística: 1º Planejamento Experimental*

As Tabelas 55 e 56 mostram os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey, para a resistência à tração perpendicular (RTP) dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental.

Tabela 55 – Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental-painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade
	RTP
%Bor	<u>0,000</u>
Esp	0,370
Press	<u>0,004</u>
%Bor×Esp	0,432
%Bor×Press	<u>0,000</u>
Esp×Press	0,771
%Bor×Esp×Press	<u>0,091</u>

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 56 – Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental- painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
RTP (MPa)	A (1,27)	A (1,40)	B (0,97)	A (1,14)	A (1,28)	B (1,11)	A (1,32)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Em relação ao 1º Planejamento Experimental, avaliando-se painéis com mistura de borracha em relação àqueles painéis contendo apenas madeira, os resultados obtidos pela ANOVA mostraram que os fatores [%Bor] e [Press] foram influentes na propriedade de resistência a tração perpendicular.

O teste de Tukey mostrou que painéis contendo somente madeira ou painéis com mistura de 50% borracha, apresentaram maiores resultados de RTP. Desempenho superior nesta propriedade também foi apresentado por painéis com maior pressão de prensagem (4 MPa).

Quanto a interação dos fatores, os resultados da ANOVA (Tabela 55) mostraram a influência da interação [%Bor×Press] para a propriedade de RTP dos painéis. A Figura 68 apresenta o gráfico de interação.

Figura 68 – Gráficos de interação entre fatores para a RTP – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].

Segundo a Figura 68, painéis com pressão 50% de borracha e 4 MPa ou painéis contendo apenas madeira e de pressão de 2,5 MPa apresentaram maior RTP.

– *Análise estatística: 2º Planejamento Experimental*

As Tabelas 57 e 58 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para a propriedade de resistência à tração perpendicular (RTP) dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental.

Tabela 57 - Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade RTP
%Bor	<u>0,000</u>
Esp	<u>0,000</u>
Press	0,674
%Bor×Esp	0,198
%Bor×Press	<u>0,001</u>
Esp×Press	0,175
%Bor×Esp×Press	0,870

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 58 - Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
RTP (MPa)	A (1,27)	A (1,04)	B (0,78)	A (1,24)	B (0,83)	A (1,04)	A (1,01)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 2º Planejamento Experimental, o qual considerou os painéis de borracha em camadas comparados aos painéis contendo apenas madeira, os resultados apresentados pela ANOVA mostraram influência significativa ($P\text{-valor} < 0,05$) para os fatores [%Bor] e [Esp] em relação à propriedade de RTP.

O Teste de Tukey evidencia que painéis contendo apenas madeira e com 50% de borracha em camadas apresentaram RTP superior. Painéis de 10 mm também se destacaram nesta propriedade, com valores de RTP 40% superiores aos painéis de maior espessura (20 mm).

Quanto a interação dos fatores, os resultados da ANOVA (Tabela 57) mostraram a influência da interação [%Bor×Press] na propriedade de RTP dos painéis. A Figura 69 apresenta o gráfico de interação.

Figura 69 - Gráficos de interação entre fatores para a RTP referente ao segundo Planejamento Experimental: [%Bor×Press].

Conforme observado na Figura 69, para menor pressão de prensagem (2,5 MPa), os maiores valores de RTP são obtidos para painéis contendo apenas madeira. Para pressão de 4 MPa, tanto os painéis sem adição de borracha quanto aqueles contendo 50% deste insumo apresentaram desempenho superior na tração perpendicular.

– Análise estatística: 3º Planejamento Experimental

As Tabelas 59 e 60 apresentam os resultados da ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey para a resistência à tração perpendicular (RTP) dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental.

Tabela 59 - Resultados da ANOVA para RTP dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores e Interações	Propriedade
	RTP
%Bor	<u>0,000</u>
Config	<u>0,000</u>
Esp	<u>0,000</u>
Press	<u>0,000</u>
%Bor×Config	0,073
%Bor×Esp	0,356
%Bor×Press	0,203

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 60 - Resultados do teste de Tukey para RTP dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental- comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores	Níveis	RTP (MPa)
%Bor	50	A (1,22)
	75	B (0,88)
Config	Cam	B (0,91)
	Mist	A (1,19)
Esp	10	A (1,19)
	20	B (0,90)
Press	2,5	B (0,94)
	4	A (1,16)

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. **Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 3º Planejamento Experimental, comparando-se os painéis das configurações camada e mistura, os resultados apresentados pela ANOVA mostraram influência significativa (P-valor <0,05) de todos os fatores estudados [%Bor], [Config], [Esp] e [Press] na propriedade de RTP.

O teste de Tukey mostra, comparando-se os tratamentos com adição de borracha, superioridade de RTP nos níveis dos fatores descritos acima de: configuração mistura, proporção de 50%, espessura do painel de 10 mm e pressão de prensagem de 4 MPa.

Os resultados da ANOVA (Tabela 59) também mostraram que não há influência da interação entre os fatores abordados, para a propriedade de RTP, considerando-se o pressuposto no 3º Planejamento Experimental.

4.3.4.5 Resistência ao arrancamento de parafuso – topo e superfície

As Tabelas 61, 62 e 63 apresentam os valores médios da resistência ao arrancamento de parafuso, em relação à superfície (RAPsup) e ao topo (RAPtop), para os tratamentos referentes aos painéis de composições 100% madeira, 100% madeira/50% borracha e 100% madeira/75% borracha.

Tabela 61 - Valores médios de RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira.

<i>Tr</i>		RAPsup	RAPtop
		(N)	(N)
<i>1</i>	$\bar{x}$	229	275
	<i>Cv</i> (%)	41,49	26,51
<i>2</i>	$\bar{x}$	572	481
	<i>Cv</i> (%)	36,23	33,52
<i>3</i>	$\bar{x}$	234	409
	<i>Cv</i> (%)	47,17	39,19
<i>4</i>	$\bar{x}$	432	589
	<i>Cv</i> (%)	26,9	21,03

Tabela 62 - Valores médios de RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira/50% borracha.

Tr		RAPsup (N)	RAPtop (N)
5	$\bar{x}$	228	447
	<i>Cv (%)</i>	34,43	36,62
6	$\bar{x}$	556	923
	<i>Cv (%)</i>	13,28	20,72
7	$\bar{x}$	343	630
	<i>Cv (%)</i>	25,56	26,57
8	$\bar{x}$	646	1122
	<i>Cv (%)</i>	23,14	27,02
9	$\bar{x}$	360	488
	<i>Cv (%)</i>	40,14	27,55
10	$\bar{x}$	556	491
	<i>Cv (%)</i>	17,35	24,01
11	$\bar{x}$	338	521
	<i>Cv (%)</i>	32,05	25,98
12	$\bar{x}$	563	434
	<i>Cv (%)</i>	19,45	44,86

Tabela 63 - Valores médios RAPsup e RAPtop - painéis 100% madeira/75% borracha.

Tr		RAPsup (N)	RAPtop (N)
13	$\bar{x}$	393	407
	<i>Cv (%)</i>	26,11	32,82
14	$\bar{x}$	409	1063
	<i>Cv (%)</i>	34,5	19,51
15	$\bar{x}$	565	762
	<i>Cv (%)</i>	21,72	33,69
16	$\bar{x}$	507	1219
	<i>Cv (%)</i>	33,24	24,41
17	$\bar{x}$	376	744
	<i>Cv (%)</i>	26,94	22,11
18	$\bar{x}$	409	398
	<i>Cv (%)</i>	16,4	24,39
19	$\bar{x}$	421	480
	<i>Cv (%)</i>	30,06	32,16
20	$\bar{x}$	662	663
	<i>Cv (%)</i>	16,73	23,12

Para a propriedade de arrancamento de parafuso na superfície (RAPsup), os tratamentos 100% madeira apresentaram valores médios entre 229N e 572 N, tratamentos 100% madeira/50% borracha tiveram resultados entre 228 N e 646 N, e de 100% madeira/75% borracha com valores entre 376 N e 662 N.

Para RAPtop, os tratamentos 100% madeira apresentaram resultados entre 275N e 589N, painéis 100% madeira/50% borracha entre 434 e 1122 N, e de 100% madeira/75% borracha entre 398N e 1219 N.

Os painéis de baixa densidade (Tr 2 a 4), pertencentes a composição 100% madeira, tiveram valores de RAPsup que atenderam ao mínimo estabelecido de 400 N, para classificação LD-1 (ANSI A208.1: 1999). Apenas o tratamento Tr 2 atende ao requisitado de ≈ 556 N pela norma CS 236 (1966) para RAPsup. Para a propriedade de RAPtop, nenhuma das normas citadas estabelecem requisito para painéis de baixa densidade.

Em relação aos painéis de média densidade, os tratamentos com 100% madeira/50% borracha (Tr 6 e 8) e com 100% madeira/75% borracha (Tr 14 e 16) atenderam aos requisitos de 800N (ABNT NBR 14810-2: 2006; ANSI A208.1: 1999) e de ≈ 711 N (CS 236: 1966) para RAPtop.

Os painéis de alta densidade (Tr 15, 17 e 20) não atingiram os requisitos das normas citadas para as propriedades de RAPsup e RAPtop.

Os resultados obtidos neste trabalho também apresentam-se coerentes com a literatura.

Semple et al. (2014) produziram painéis de partículas de abeto (*Picea glauca* [Moench] Voss), resíduos de serrarias de *Pinus* spp. e adesivo fenol-formaldeído, obtendo desempenho de 543,75 N para o arrancamento de parafuso no topo.

Macedo (2008) obteve para painéis de madeira de *Pinus taeda*, borracha de pneu e 8% de adesivo fenol-formaldeído, valores de arrancamento de parafusos (superfície) de 313N e 556 N para amostras contendo 30% e 45% de borracha, respectivamente.

Rauber (2011) analisou a resistência ao arrancamento de parafusos na superfície para painéis de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com inclusão de resíduos de poliuretano provenientes de solados de calçados, utilizando como adesivo um pré-polímero de poliisocianato modificado com base MDI. A propriedade variou de acordo com as proporções do resíduo poliuretano de 0%, 30% e 45%, com resultados de 161,9 N, 205,8 N e 195,7 N, respectivamente.

A resistência de painéis de partículas em relação a ligações com parafusos não é abordada com frequência na literatura (Kowaluk e Fuczek, 2010). Entretanto, é um parâmetro bastante considerável em aplicações como mobiliário, pavimentos e revestimentos de parede.

– *Análise estatística: 1º Planejamento Experimental*

As Tabelas 64 e 65 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para a propriedade de resistência ao arrancamento de parafuso - superfície (RAPsup) e topo (RAPtop), referente ao 1º Planejamento Experimental.

Tabela 64 - Resultados da ANOVA para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental - painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade	
	RAPsup	RAPtop
%Bor	<u>0,011</u>	<u>0,007</u>
Esp	0,075	0,492
Press	0,383	0,285
%Bor×Esp	0,165	<u>0,003</u>
%Bor×Press	<u>0,009</u>	0,215
Esp×Press	0,592	<u>0,046</u>
%Bor×Esp×Press	0,067	0,101

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 65 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 1º Planejamento Experimental - painéis com mistura de borracha × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
RAPsup (N)	B (367)	A (454)	A (467)	A (436)	A (513)	A (417)	A (442)
RAPtop (N)	B (439)	A (484)	A (571)	A (386)	A (509)	A (479)	A (516)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Em relação ao 1º Planejamento Experimental, comparando painéis com mistura de borracha e painéis contendo apenas madeira, os resultados da ANOVA mostraram influência

significativa (P-valor $<0,05$) apenas para o fator [%Bor] nas propriedades de RAPsup e RAPtop dos painéis.

Pelo teste de Tukey é possível observar que painéis com mistura de borracha refletiram em RAPsup e RAPtop superiores, indiferentemente da proporção de borracha de pneu utilizada.

Quanto a interação dos fatores (Tabela 64), a interação [%Bor×Press] foi significativa na RAPsup, enquanto as interações [%Bor×Esp] e [Esp×Press] foram significativas para RAPtop, fato observado por P-valores $<0,05$. As Figuras 70 e 71 apresentam os gráficos das interações.

Figura 70 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Press].

Pela Figura 70 é possível observar que, valores superiores de RAPsup são obtidos para painéis com mistura de borracha, nas condições 100%madeira/75% borracha e pressão de 4 MPa ou 100% madeira/50% borracha e pressão 2,5 MPa.

Figura 71 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPtop – 1º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp](a) e [Esp×Press](b).

Nota-se, pela Figura 71a, que melhores desempenhos de RAP_{top} se alcançaram para painéis de 10 mm, quando misturada borracha na proporção de 75%. Painéis de 20 mm, tanto com mistura de 75% borracha quanto contendo apenas madeira, apresentaram valores superiores desta propriedade.

Em relação à interação [Esp×Press], Figura 71b, o efeito da pressão de prensagem é diretamente proporcional à espessura dos painéis, para promover valores superiores de RAP_{top}, ou seja, desempenho superior para painéis de menor espessura e pressão de prensagem (10 mm e 2,5 MPa) ou para maior espessura e pressão de prensagem (20 mm e 4 MPa).

– *Análise estatística: 2º Planejamento Experimental*

As Tabelas 66 e 67 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para a resistência ao arrancamento de parafuso - superfície (RAP_{sup}) e topo (RAP_{top}), referente ao segundo Planejamento Experimental.

Tabela 66 - Resultados da ANOVA para RAP_{sup} e RAP_{top} dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Fatores e Interações	Propriedade	
	RAP _{sup}	RAP _{top}
%Bor	<u>0,024</u>	<u>0,000</u>
Esp	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Press	0,061	<u>0,000</u>
%Bor×Esp	<u>0,000</u>	0,121
%Bor×Press	<u>0,016</u>	0,502
Esp×Press	0,179	0,458
%Bor×Esp×Press	0,710	0,614

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 67 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 2º Planejamento Experimental - painéis com borracha em camada × painéis contendo apenas madeira.

Propriedade	Fatores						
	%Bor (%)			Esp (mm)		Press (MPa)	
	0	50	75	10	20	2,5	4
RAPsup (N)	B (367)	A (443)	A (468)	B (332)	A (521)	A (398)	A (455)
RAPtop (N)	B (439)	A (780)	A (863)	B (488)	A (899)	B (599)	A (788)

*[%Bor] = adição de borracha; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. **Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

No 2º Planejamento Experimental, comparando-se painéis com borracha em camada e aqueles contendo apenas madeira, os resultados da ANOVA mostraram influência significativa (P-valor <0,05) na propriedade RAPsup para os fatores [%Bor] e [Esp]. Na RAPtop, todos os fatores foram influentes [%Bor], [Esp] e [Press].

O teste de Tukey mostra que, para RAPsup e RAPtop, resultados superiores se obtêm em painéis com borracha em camada, independente da proporção, e para painéis de maior espessura (20 mm). Além disso, pressão de prensagem superior (4 MPa) também resulta em maiores valores de RAPtop.

A interação dos fatores (Tabela 66), no 2º Planejamento Experimental, foi influente apenas para RAPsup, interações [%Bor×Esp] e [%Bor×Press]. A Figura 72 apresenta os gráficos de interação.

Figura 72 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 2º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).

Para RAPsup, o gráfico da interação [%Bor×Esp] (Figura 72a) mostra que, melhores desempenhos foram alcançados para painéis de 10 mm e 75% de borracha ou painéis de 20 mm e 50% de borracha. Na interação [%Bor×Press] (Figura 72b), painéis com pressão de 4 MPa foram superiores quando utilizada proporção de 75% de borracha, enquanto para painéis de 2,5 MPa, o desempenho não teve influência da adição de borracha.

– *Análise estatística: 3º Planejamento Experimental*

As Tabelas 68 e 69 apresentam os resultados da ANOVA e teste de comparações múltiplas de Tukey, para a resistência ao arrancamento de parafuso - superfície (RAPsup) e topo (RAPtop), referente ao 3º Planejamento Experimental.

Tabela 68 - Resultados da ANOVA para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores e Interações	Propriedade	
	RAPsup	RAPtop
%Bor	0,425	0,081
Config	0,840	<u>0,000</u>
Esp	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Press	<u>0,000</u>	0,063
%Bor×Config	0,797	0,945
%Bor×Esp	<u>0,000</u>	0,833
%Bor×Press	<u>0,048</u>	0,620

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem. ** Os valores sublinhados representam significância estatística, como P-valor < 0,05.

Tabela 69 - Resultados do teste de Tukey para RAPsup e RAPtop dos painéis, referente ao 3º Planejamento Experimental - comparativo entre as configurações de borracha nos painéis – camada e mistura.

Fatores	Níveis	RAPsup (N)	RAPtop (N)
%Bor	50	A (449)	A (632)
	75	A (468)	A (717)
Config	Cam	A (456)	A (822)
	Mist	A (461)	B (527)
Esp	10	B (378)	B (560)
	20	A (539)	A (789)
Press	2,5	B (411)	A (620)
	4	A (506)	A (729)

*[%Bor] = adição de borracha; [Config] = configuração da borracha nos painéis; [Esp] = espessura dos painéis; [Press] = pressão de prensagem.**Letras maiúsculas distintas acima do valor médio da propriedade (entre parênteses) representam diferença estatística entre os níveis de um mesmo fator.

Em relação ao 3º Planejamento Experimental, com comparativo entre as configurações de borracha – camada e mistura, os resultados da ANOVA mostraram influência significativa (P-valor <0,05) em RAPsup para os fatores [Esp] e [Press], enquanto para RAPtop os fatores influentes foram [Config] e [Esp].

Pelo teste de Tukey se constata maior desempenho de RAPsup para painéis de 20 mm e pressão de 4 MPa. Para RAPtop, painéis com borracha em camada e espessura 20 mm, apresentaram valores superiores.

A interação dos fatores, no 3º Planejamento Experimental, verificada pelo resultado da ANOVA (Tabela 68), foi influente apenas para a propriedade RAPsup, para as interações [%Bor×Esp] e [%Bor×Press]. A Figura 73 apresenta os gráficos de interação.

Figura 73 - Gráficos de interação entre fatores para a RAPsup – 3º Planejamento Experimental: [%Bor×Esp] (a) e [%Bor×Press] (b).

A Figura 73a mostrou que, comparando-se painéis contendo borracha nas configurações camada e mistura, a espessura dos painéis é inversamente proporcional à quantidade de borracha, quando alcançados maiores valores de RAPsup. Para a interação [%Bor×Press], a proporção de borracha é diretamente proporcional à pressão de prensagem, para painéis de maior desempenho nesta propriedade.

4.3.5 Determinação das propriedades para o isolamento térmico

Nos tópicos a seguir são apresentados os resultados referentes às propriedades térmicas dos painéis de partículas e espumas poliuretanas destinados às composições termoacústicas.

4.3.5.1 Condutividade térmica e resistência térmica

A Tabela 70 apresenta os valores médios das leituras obtidas pelo método da coluna fracionada modificado, para a propriedade de condutividade térmica, referente aos 20 tratamentos dos painéis, região de borracha de pneu dos painéis e espumas poliuretanas.

Tabela 70 - Valores médios da condutividade térmica (k) - painéis de partículas e espumas poliuretanas.

Tr	Descrição (Constituição/Configuração/Pressão Prensagem/Espessura)	k (W/m.K)	
		$\bar{x}$	CV (%)
1	100% madeira/ 2,5 MPa/ 10 mm	0,11	23,08
2	100% madeira/ 2,5 MPa/ 20 mm	0,15	24,36
3	100% madeira/ 4 MPa/ 10 mm	0,11	26,81
4	100% madeira/ 4 MPa/ 20 mm	0,16	19,42
5	100% madeira/50% borracha/ camada/ 2,5 MPa/ 10 mm	0,17	21,88
6	100% madeira/50% borracha/ camada/ 2,5 MPa/ 20 mm	0,20	25,30
7	100% madeira/50% borracha/ camada/ 4 MPa/ 10 mm	0,19	21,24
8	100% madeira/50% borracha/ camada/ 4 MPa/ 20 mm	0,20	21,02
9	100% madeira/50% borracha/ mistura/ 2,5 MPa/ 10 mm	0,16	25,75
10	100% madeira/50% borracha/mistura/ 2,5 MPa/ 20 mm	0,19	29,15
11	100% madeira/50% borracha/ mistura/ 4 MPa/ 10 mm	0,13	20,05
12	100% madeira/50% borracha/ mistura/ 4 MPa/ 20 mm	0,23	18,40
13	100% madeira/75% borracha/ camada/ 2,5 MPa/ 10 mm	0,14	25,88
14	100% madeira/75% borracha/ camada/ 2,5 MPa/ 20 mm	0,21	25,74
15	100% madeira/75% borracha/ camada/ 4 MPa/ 10 mm	0,17	22,39
16	100% madeira/75% borracha/ camada/ 4 MPa/ 20 mm	0,21	21,13
17	100% madeira/75% borracha/ mistura/ 2,5 MPa/ 10 mm	0,15	24,80
18	100% madeira/75% borracha/mistura/ 2,5 MPa/ 20 mm	0,20	29,18
19	100% madeira/75% borracha/ mistura/ 4 MPa/ 10 mm	0,14	27,29
20	100% madeira/75% borracha/ mistura/ 4 MPa/ 20 mm	0,20	23,14
	Espuma PU mamona	0,05	20,45
	Espuma PU comercial	0,06	22,34
	Borracha de pneu	0,12	7,35

Menores valores de condutividade térmica (k) implicam em maior capacidade de isolamento dos materiais. Por meio dos valores médios de k obtidos para os painéis de partículas, observou-se que tratamentos contendo somente madeira apresentaram desempenho superior, com o menor valor de k para Tr 1 e 3 (0,11 W/m.K). O tratamento que resultou em desempenho menos favorável foi o Tr 12 (0,23 W/m.K), com adição de borracha.

Em geral, todos os painéis de partículas de menor espessura apresentaram menor condutividade térmica quando comparados a tratamentos semelhantes em constituição/configuração/pressão.

A norma ABNT NBR 15220 (2003) menciona valores de condutividade térmica para aglomerados de madeira de densidades baixa e média. A Figura 74 estabelece um comparativo entre a norma citada e os tratamentos compreendidos nestas faixas de densidade.

Figura 74 – Comparativo de condutividade térmica: tratamentos de baixa e média densidade × valores da NBR 15220 (2003).

Os tratamentos Tr 1 e 3 (baixa densidade) e Tr 5, 9 e 11 (média densidade) apresentaram-se coerentes com a norma citada. Entretanto, a ABNT NBR 15220 (2003) destaca que os valores da norma são apenas indicativos e, sempre que possível, deve-se utilizar valores medidos em laboratório. Isto se deve às diferentes características dos materiais, as quais podem influenciar nesta propriedade. Os painéis produzidos neste trabalho também apresentaram resultados quanto à condutividade térmica próximos aos encontrados na literatura, conforme destaca a Tabela 71.

Tabela 71 – Condutividade térmica (k) de painéis/compósitos de partículas.

Material	k (W/m.K)	Densidade (Kg/m ³)	Fonte
Tr 1 - 100% madeira+adesivo PU mamona.	0,11	590	Estudo em questão
Tr 17 -100% madeira/75% borracha+ adesivo PU mamona.	0,15	820	
Painel de partículas de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden+adesivo MDI.	0,098	340	Rauber (2011)
Painel de fibras de caule de algodão - sem resina e aditivos.	0,0815	450	Zhou et al. (2010)
Painel de casca de coco e casca do fruto <i>Durio zibethinus</i> +adesivo ureia-formaldeído.	0,1342	822	Khedari et al. (2004)
Painéis de resíduos de espuma de poliestireno e casca de milho+adesivo ureia formaldeído.	0,1398	726	Lertsutthiwong et al. (2008)
	0,1936	969	
	0,2507	980	
Grânulos de borracha consolidado	0,075	450	Benkreira, Khan e Horoshenkov (2011)

Segundo Luamkanchanaphan; Chotikaprakhan e Jarusombati (2012), a condutividade térmica se relaciona diretamente à densidade dos painéis isolantes: maiores densidades levam a condutividade térmica mais elevada. Apesar dos painéis serem produtos sólidos, sua estrutura contém grande quantidade de vazios entre as fibras/partículas, ainda em maior proporção com a diminuição da densidade. Zhou et al. (2010) citam que o desempenho do material isolante é devido a baixa condutividade térmica do ar contido nestes vazios.

Neste trabalho, os valores de condutividade para grande parte dos tratamentos, de diferentes densidades, não obedeceram a este fenômeno. Todavia, segundo os resultados do ensaio de PIM dos painéis (item 4.3.4) as variações na pressão de prensagem também podem ter influenciado na porosidade dos painéis.

Segundo Cravo (2013) outro fator determinante nesta propriedade é a mistura de diferentes matérias-primas, já que cada material possui uma condutividade térmica específica.

A região de borracha de pneu do painel apresentou condutividade térmica de 0,12 W/m.K (Tabela 70), valor maior comparado a literatura (0,075 W/m.K) de Benkreira; Khan e Horoshenkov (2011). O valor de k da borracha foi muito próximo àqueles de painéis contendo somente madeira (0,11 W/m.K). Sendo assim, a combinação dos efeitos das demais variáveis de produção também pode ter influenciado nesta propriedade.

Para as espumas poliuretanas, a amostra derivada do óleo de mamona apresentou melhor desempenho comparada a amostra comercial, derivada do petróleo. A Tabela 72 apresenta valores de condutividade térmica das espumas deste trabalho e de alguns materiais utilizados como enchimento de paredes/coberturas.

Tabela 72 – Condutividade térmica (k) de materiais utilizados na construção civil como enchimento de paredes/coberturas.

Material	k (W/m.K)	Densidade (Kg/m³)	Fonte
Espuma PU à base de mamona	0,05	84	Estudo em questão
Espuma comercial	0,06	38	
Espuma PU à base de mamona	0,045	37	Cardoso (2010)
Espuma rígida de poliuretano	0,03	30-40	NBR 15220 (2003)
Poliestireno expandido moldado	0,04	15-35	
Produtos comerciais			
Placa de poliuretano para coberturas	0,016	36 - 40	ISAR (2014)
Lã de Rocha	0,027	64	

As espumas poliuretanas analisadas neste trabalho apresentaram maiores valores de condutividade térmica que produtos de mesma aplicação. Entretanto, a espuma poliuretana à base de mamona, mostrou valores próximos ao obtido por Cardoso (2010), para material semelhante, e para poliestireno expandido citado na ABNT NBR 15220 (2003).

A Tabela 73 apresenta os resultados da resistência térmica, estimada por meio da condutividade térmica, dos painéis e espumas poliuretanas.

Tabela 73 - Resistência térmica (R) - painéis e espumas poliuretanas.

Tr/Amostra	R (m ² .K/W)
1	0,0902
2	0,1367
3	0,0936
4	0,1286
5	0,0603
6	0,1014
7	0,0519
8	0,1020
9	0,0629
10	0,1055
11	0,0771
12	0,0878
13	0,0704
14	0,0933
15	0,0583
16	0,0962
17	0,0672
18	0,1025
19	0,0696
20	0,0990
Espuma PU mamona	0,9148
Espuma PU comercial	0,8511

No caso da resistência térmica (R), propriedade diretamente proporcional à espessura do elemento construtivo, maiores valores implicam em maior capacidade de isolamento. A análise dos valores da resistência térmica mostrou que os tratamentos que levaram a maiores valores de R ,

dentro de cada constituição, foram: Tr 2 -100% madeira ($0,1367 \text{ m}^2\text{K/W}$); Tr 10 - 100% madeira/50% borracha ($0,1055 \text{ m}^2\text{K/W}$) e Tr 18 - 100% madeira/75% borracha ($0,1025 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Cravo (2013) produziu painéis híbridos de baixa densidade, provenientes de casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana à base de óleo de mamona, espessura de 20 mm, determinando R de aproximadamente $0,0673 \text{ m}^2\text{K/W}$. Comparando-se os tratamentos Tr 2, 10 e 18 com a referência citada, em relação à painel de mesma espessura (20 mm), observou-se valores de R superiores.

4.3.5.2 Resistência térmica total e transmitância térmica

Com base nos valores da Tabela 73 e na situação exemplificada no Anexo C - ABNT NBR 15220 (2003), foram determinadas a resistência térmica da parede (R_t), resistência térmica total (R_T) e transmitância térmica (U) de composições termoacústicas. As montagens dos painéis foram simuladas em parede de concreto de 85 mm, com camada de ar ou preenchimento com espuma PU de mamona (50 mm), considerando-se fluxo de calor perpendicular ao plano (Figura 75).

Figura 75 – Esquema da montagem das composições - determinação da transmitância térmica (dimensões em mm).

Os tratamentos selecionados foram Tr 2, 10 e 18, os quais apresentaram maior resistência térmica em relação às amostras de mesma constituição, além da espuma PU de mamona. A Tabela 74 apresenta os obtidos para estas propriedades.

Tabela 74 – Valores de R_t , R_T e U para as composições termoacústicas em parede.

Composição	* R_t (m ² .K/W)	** R_T (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)
Tr 2/camada de ar/parede	0,3452	0,5152	1,94
Tr 2/espuma PU mamona/parede	1,1000	1,2700	0,79
Tr 10/camada de ar/parede	0,3140	0,4840	2,07
Tr 10/ espuma PU de mamona/parede	1,0688	1,2388	0,81
Tr 18/ camada de ar/parede	0,3111	0,4811	2,08
Tr 18/espuma PU de mamona/parede	1,0658	1,2358	0,81

*Para cálculo de R_b , $R_{ar} = 0,16$ m².K/W; **para cálculo do R_T , $R_{se} = 0,04$ m².K/W e $R_{si} = 0,13$ m².K/W, segundo a ABNT NBR 15220 (2003).

As composições preenchidas com a espuma PU de mamona (Tabela 74) apresentam valores em média de 0,80 W/m².K, para uma parede com espessura total de 155 mm (15,5 cm). Estes valores encontram-se próximos aos encontrados em sistemas construtivos com painéis isolantes comerciais de madeira ($U = 0,60$ W/m².K), conforme apresenta a Figura 76.

EXEMPLO: PAREDE PERIMETRAL SEMPLICE

STRUCTURE THICKNESS
20,0 cm
STRUCTURE AREA DENSITY
172 (±2,5) Kg/m ²
STRUCTURE COMPONENTS
<ul style="list-style-type: none"> • Celenit L3 • Blocks for hollow bricks partitions • Lime mortar plaster (class M2) • Plasterboard boards
EVALUATION OF SOUND INSULATION INDEX
(Calculation based on UNI EN ISO 717-1 on laboratory data according to UNI EN ISO 140-3 standard)
59 dB
THERMAL TRANSMITTANCE
0,60 W/m ² .K

Figura 76 – Representação de parede simples com painel isolante térmico – transmitância térmica.

Fonte: Ecoplace (2012).

Paiva et al. (2012) obtiveram para simulações de divisórias, feitas com painéis de sabugo de milho (densidade 334 kg/m^3), valores de U de aproximadamente $2,14 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (espessura 30 mm) e de $0,95 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (espessura 80 mm). Comparando-se à literatura, neste trabalho, a transmitância térmica das composições com camada de ar, em torno de $2,0 \text{ W/m}^2\text{.K}$ e daquelas contendo espuma PU de mamona ($0,80 \text{ W/m}^2\text{.K}$) mostraram desempenho superior; no entanto, a espessura do conjunto construtivo do presente trabalho é maior.

Em geral, o desempenho das composições termoacústicas e de seus constituintes apresentaram resultados próximos. Em alguns casos, foram inferiores às propriedades para isolamento comparadas às citações (literatura e produtos comerciais). No entanto, ressalta-se a característica sustentável deste produto, oriundo de rejeitos, de insumos renováveis e derivados de biomassa.

4.3.6 Determinação da propriedade de absorção sonora

A seguir são apresentados os valores dos coeficientes de absorção sonora (α_s) obtidos pelo método da câmara reverberante, escala 1:5, nas seis faixas de frequências (500 a 16000 Hz), transformadas em escala real: 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1600 Hz e 3200 Hz. Conforme já citado, o coeficiente α_s varia de 0 a 1 e quanto mais próximos de 1, maior absorção sonora do material (absorção de 100% da energia da onda sonora).

4.3.6.1 Medições Preliminares

As Figuras 77 e 78 apresentam gráficos com comparativos dos coeficientes de absorção (α_s) para amostras contendo 50% e 75% de borracha de pneu, nas configurações camada e mistura de borracha.

Figura 77 - Coeficiente de Absorção Sonora: comparativo entre painéis contendo 50 e 75% de borracha na configuração “mistura borracha - MB”.

Figura 78 – Coeficiente de Absorção Sonora: comparativo entre painéis contendo 50 e 75% de borracha na configuração “camada”.

Pela análise da Figura 77, nota-se que os valores do coeficiente de absorção para painéis com mistura borracha, em proporções de 50 e 75%, considerando-se amostras de mesmas variáveis (pressão de prensagem e espessura) são bastante semelhantes.

Na configuração em camadas (Figura 78), nota-se menor paridade dos coeficientes de absorção para as amostras de mesmas variáveis (pressão de prensagem e espessura), em

proporção 50 e 75%, apesar de os valores de α_s permanecerem muito próximos. Todavia, este comportamento pode estar mais relacionado à própria configuração dos painéis (camada ou mistura) do que à composição.

Baseando-se nestas medições preliminares, optou-se pela análise acústica das amostras constituídas de 50% de borracha, nas duas configurações, devido à menor densidade destes painéis. Segundo Moreira (2009), um dos fatores que interfere na absorção acústica é a resistência do material ao fluxo de ar, ou seja, o grau de dificuldade com que o ar passa pelo material; quanto maior a densidade, maior a resistência ao fluxo e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de absorção será baixo. Apesar disso, a resistência ao fluxo de ar também é dependente da porosidade, havendo a possibilidade da adição da borracha ser influente na propriedade de absorção acústica.

- Medição do esquadro aplicado como caixa de ar

Os valores das medições em câmara reverberante (1:5), referentes aos coeficientes de absorção sonora do esquadro de madeira utilizado na simulação da caixa de ar, são apresentados na Tabela 75.

Tabela 75 – Determinação dos coeficientes de absorção do esquadro.

Amostra	Frequência (Hz)					
	100	200	400	800	1600	3200
Esquadro para caixa de ar	0,01	0,03	0,06	0,07	0,10	0,00

Verificou-se que os valores do coeficiente α_s , em todas as frequências analisadas estão próximos a zero, sendo o máximo de absorção de apenas 10% da onda sonora incidente. Segundo a norma ISO 11654 (1997), em valores de α abaixo de 0,10 o material não possui classificação como absorvente. Deste modo, a influência do esquadro nas medições realizadas nos painéis e espumas foi desconsiderada.

4.3.6.2 Medições Principais

Por meio das medições descritas nas etapas 1 a 7 (Tabela 16), foram feitas as análises dos resultados com base nos efeitos da constituição, configuração e sistema de montagem, na propriedade de absorção sonora das composições termoacústicas. Em relação ao sistema de montagem, os itens *a*, *b*, *c* e *d* referem-se ao mecanismo de absorção de “material poroso”, enquanto os itens *f* e *g* destacam as condições destes painéis com a camada de ar e preenchimento com as espumas poliuretanas.

a) Efeito da posição das camadas de borracha e madeira em relação à base da câmara

O desempenho fonoabsorvente dos tratamentos 6 e 8, nas etapas 1 e 2 (Tabela 16), é apresentado na Figura 79. Na etapa 1, os painéis destes tratamentos foram posicionados com a camada de madeira para cima (em relação à base da câmara). Na etapa 2, a camada ou face de borracha foi voltada para cima (mesmas amostras nomeadas como 6B e 8B).

Figura 79 - Coeficiente de Absorção Sonora: efeito da posição das camadas de madeira e borracha dos painéis em relação à base da câmara reverberante.

Observou-se que o posicionamento das camadas foi bastante influente no coeficiente de absorção sonora dos painéis. Isto ocorreu principalmente em valores desta propriedade obtidos em frequências acima de 200 Hz. Em frequência de 3200 Hz, painéis da amostra 6 com a camada de madeira voltada para cima resultaram em coeficientes de aproximadamente 0,65, enquanto os mesmos painéis, com a face de borracha para cima (6B), proporcionaram valor de α_s de 0,40.

Nas amostras 6 e 8, a absorção sonora na frequência máxima de medição foi 50% superior para face de madeira voltada para cima. Pelo próprio princípio da absorção sonora, a superfície do material absorvente é determinante neste fenômeno já que parte do som que atinge esta superfície é absorvida, sendo o restante refletido e também transmitido para seu interior (OLIVEIRA, 2009).

O comportamento da face da borracha de pneu pode estar relacionado à porosidade desta camada. Como definido no item 4.3.2.2, as regiões de painéis com pressão de 2,5 MPa, contendo somente borracha, apresentam 4,61 vezes menos porosidade do que regiões contendo somente a madeira. As regiões de painéis de madeira têm maior porosidade, pois levam em consideração tanto os interstícios entre partículas quanto os vazios internos da microestrutura da madeira, tais como traqueídes, vasos, etc. Contrariamente, a borracha possui uma estrutura quase que impermeável, sendo a porosidade definida pelos espaços entre grânulos (Figura 80).

Figura 80 – Efeito da porosidade no desempenho fonoabsorvente: (a) partícula de madeira com vazios internos de sua microestrutura (em destaque); (b) superfície pouco permeável da borracha.

Por esta razão, os demais ensaios para painéis de camadas foram realizados com a face de madeira voltada para cima. Este posicionamento se torna importante, pois a borracha permanece na parte interna da parede, assim como com espumas, devido à combustibilidade destes materiais (RODRIGUES, 2008).

b) *Efeito da espessura e da pressão de prensagem dos painéis*

As Figuras 81, 82 e 83 apresentam gráficos dos coeficientes de absorção sonora nas respectivas frequências para painéis contendo apenas madeira “testemunhas” (Tr 1 a 4), painéis com 50% borracha na configuração camada (Tr 5 a 8) e painéis com 50% borracha na configuração mistura (Tr 9 a 12).

Figura 81 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 100%madeira “testemunhas”.

Figura 82 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 50% de borracha na configuração camada.

Figura 83 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da pressão de prensagem e espessura dos painéis – amostras contendo 50% de borracha na configuração mistura borracha (MB).

No que diz respeito à espessura, para todas as amostras analisadas (Figuras 81, 82 e 83), independente da constituição (100% madeira ou 100% madeira/50% borracha) ou configuração (camadas ou mistura borracha), esta variável foi determinante no comportamento fonoabsorvente dos painéis. Para painéis de 20 mm, obtiveram-se maiores coeficientes α_s em praticamente todas as faixas de frequências em relação às mesmas amostras com 10 mm (Tr 1 e 3), principalmente em baixas frequências (100 a 200 Hz). Este efeito teve maior predominância nos painéis contendo apenas madeira “testemunhas” (Figura 81). Isto pode estar relacionado ao fato de o mecanismo de absorção ser mais evidente em amostras homogêneas, em relação aos seus constituintes, extinguindo-se outros fatores influentes. Segundo Seddeq (2009), a espessura tem relação direta na absorção sonora dos materiais, principalmente com o aumento dos valores de α_s em baixas frequências.

ALRahman, Raja e Rahman (2013) analisaram a relação da espessura com os coeficientes de absorção sonora de painéis com variação de espessuras 20 e 40 mm, produzidos com fibras de coco. Os autores verificaram para amostras de 20 mm, coeficiente de absorção de aproximadamente 0,71 na faixa de frequência de 4184.38 - 4575 Hz, enquanto para painéis de 40 mm, um coeficiente de 0,77 foi obtido em faixas de baixa frequência - 2434.38- 2543.75 Hz.

Em relação à pressão de prensagem, para todas as constituições ou configurações dos painéis, a resposta foi semelhante: maior pressão de prensagem dos painéis reduziu o coeficiente de absorção em frequências superiores. Na faixa de frequência de 1600 Hz, os painéis com pressão de prensagem de 4 MPa apresentaram a absorção máxima.

c) *Efeito da configuração de painéis com borracha de pneu (camada ou mistura borracha)*

A Figura 84 apresenta o efeito da configuração dos painéis contendo borracha de pneu, em camada ou como mistura.

Figura 84 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da configuração dos painéis contendo borracha - comparativo entre camada e mistura de borracha (MB).

Pela análise do gráfico (Figura 84), é possível observar que a configuração dos painéis contendo borracha apresentou pouca influência na propriedade de absorção do som. Este fato é destacado pela tendência semelhante entre as amostras de painéis de 10 mm (tratamentos 5 e 9) e principalmente entre as amostras dos tratamentos 7 e 11, nas quais os valores do coeficiente de absorção sonora coincidiram praticamente em todas as frequências analisadas. Nas amostras dos painéis de 20 mm este comportamento não foi observado entre amostras com mesmas variáveis, porém de diferentes configurações (camada ou mistura), como observado confrontando os tratamentos 6 e 10 e também 8 e 12. Deste modo, observou-se que a espessura dos painéis foi bastante determinante na absorção, indiferentemente da configuração da borracha nos painéis.

d) *Efeito da adição de borracha*

Para avaliar o efeito da adição de borracha na propriedade de absorção do som, foram comparados entre si os painéis 100% madeira (Tr 1 a 4), e os painéis da configuração mistura de borracha (Tr 9 a 12), conforme mostra a Figura 85.

Figura 85 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da adição de borracha – comparativo entre amostras contendo madeira e amostras com adição de borracha (configuração mistura borracha - MB).

Pela análise da Figura 85, observa-se que, em geral, os painéis com adição de borracha apresentam menores coeficientes de absorção ao longo de todas as faixas de frequência.

Confrontando-se amostras com apenas madeira e aquelas com adição de borracha, nas mesmas condições de espessura e prensagem, nota-se que os valores de coeficiente de absorção máxima, obtidos na faixa de frequência de 3200 Hz, resultam em variações mínima de 17,3%, para os tratamentos 1 e 9, e máxima de 36,5%, para Tr 4 e 12.

Mahzan et al. (2010) produziram painéis de fibra de coco com adição de borracha de pneu, verificando que o aumento da porcentagem de borracha diminuiu substancialmente a quantidade de poros dos painéis. Esta característica pode ter sido influente na absorção dos painéis, na qual painéis contendo 100% de borracha apresentaram um pico de absorção com coeficiente próximo de 0,5 para frequência de 6000 Hz, enquanto painéis contendo 60% borracha e 40% de fibra de coco apresentaram, na mesma frequência, coeficiente de absorção igual a 0,8.

Como apresentado no item 4.3.2.2, os painéis contendo somente madeira apresentaram porosidade até 16% maiores que amostras com mistura borracha, o que pode ter influenciado sua

resposta fonoabsorvente. Destaca-se que os painéis com composição 100% madeira, referentes às amostras 2 e 4, apresentaram maiores valores de α_s em todas as faixas de frequência comparadas às demais.

e) *Efeito da camada de ar*

Para análise do efeito da camada de ar e posterior preenchimento destas lacunas com as espumas poliuretanas, baseou-se no desempenho satisfatório dos painéis de espessura 20 mm. Sendo assim, foram selecionados seis tratamentos: 2, 4, 6, 8, 10 e 12. As Figuras 86, 87 e 88 apresentam os resultados das montagens com e sem camada de ar de 5 cm, no qual estabeleceu-se um comparativo entre os tratamentos contendo madeira (2 e 4), tratamentos configurados em camadas (6 e 8) e tratamentos configurados em mistura de borracha (10 e 12).

Figura 86 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras contendo madeira (Tr 2 e 4) e medições com camada de ar (Tr 2' e 4').

Figura 87 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras configuradas em camadas de borracha (Tr 6 e 8) e medições com camada de ar (Tr 6' e 8').

Figura 88 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito da camada de ar de 5 cm – comparativo entre amostras configuradas em mistura borracha (Tr 10 e 12) e medições com camada de ar (Tr 10' e 12').

Analisando as figuras 86, 87 e 88, verifica-se que, para todas as amostras analisadas, o efeito da camada de ar foi o semelhante: redução dos valores do coeficiente em baixas frequências e aumento do coeficiente α_s em altas frequências. Nas amostras contendo madeira, o ponto no qual essa mudança ocorreu foi numa frequência entre 400 e 800 Hz, possivelmente próxima a 600 Hz. Nas amostras contendo borracha, independente de sua configuração, esta mudança ocorreu exatamente na frequência de 800 Hz.

O comportamento atribuído ao mecanismo dos painéis vibrantes de absorção de sons graves de baixas frequências, com picos de absorção em torno de sua frequência de ressonância, não foi verificado. Ressalta-se que tal comportamento é obtido para painéis de pequena espessura. Possivelmente a espessura dos painéis produzidos neste trabalho refletiu em seu comportamento frente a este fenômeno.

As frequências de ressonância calculadas, de 80 Hz (painéis 100% madeira) e de 67 Hz (painéis 100% madeira/50% borracha), conforme Equação 1, não coincidiram com o resultado experimental, já que a absorção sonora máxima foi alcançada em grande parte das amostras na maior frequência de medição – 3200 Hz. Além disso, não se sabe se esta frequência foi correspondente ao pico de absorção máxima, visto que o procedimento de ensaio na câmara reverberante escala 1:5 permite leituras até esta frequência. Geralmente, ensaios em escala real são realizados para leituras até 4000 Hz.

Em relação ao efeito da camada de ar, tendência semelhante foi obtida por Moreira (2009) para painéis cimentícios perfurados. Em ensaios contendo a camada de ar, o autor observou aumento do coeficiente de absorção nas altas frequências, ficando limitada a comprovação da frequência de ressonância pela restrição do método do tubo de impedância (medidas até frequência de 1000 Hz).

De acordo com Patrício e Patraquim (2008), o aumento da profundidade da caixa de ar acarreta na redução da frequência de ressonância do sistema absorvedor e num aumento da absorção sonora máxima. Oliveira (2009) notou comportamento semelhante para caixas de ar de 40 mm e 80 mm, em que maior espessura da caixa de ar provocou a translação da curva de valores da absorção sonora, diminuindo a frequência onde a absorção é máxima.

Neste sentido, os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que se obteve um aumento de α_s em altas frequências, proporcionando assim aplicações nas quais este comportamento seja requisitado.

f) Efeito do preenchimento da camada de ar com as espumas poliuretanas

Para análise do efeito do preenchimento da camada de ar, os resultados das medidas acústicas obtidas somente para as espumas são apresentados na Figura 89.

Figura 89 - Coeficiente de Absorção Sonora: desempenho das espumas poliuretanas – derivada de mamona e comercial.

Baseando-se nos resultados da Figura 89, o desempenho acústico das espumas PU apresentou certa semelhança em frequências abaixo de 1600 Hz. Acima desta faixa, a espuma PU derivada de mamona apresentou maior coeficiente de absorção. Ressalta-se a semelhança dos resultados obtidos para as espumas PU com a literatura. Em trabalho abordando compósitos de espumas PU com adição de 2% de casca de arroz, Wang et al. (2013) obtiveram coeficientes de absorção próximos a 0,3 em frequência de 400 Hz.

A seguir são demonstrados os comparativos entre as montagens das amostras com caixa de ar e sem preenchimento ('), com caixa de ar/preenchimento com espuma PU de mamona (") e com caixa de ar/preenchimento com espuma PU comercial ("). As Figuras 90, 91 e 92 apresentam os resultados para as amostras contendo madeira (2 e 4), amostras configuradas em camadas (6 e 8) e amostras configuradas em mistura de borracha (10 e 12).

Figura 90 - Coeficiente de Absorção Sonora: amostras sem preenchimento da camada de ar (') com as espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras 100% madeira.

Em relação aos painéis contendo 100% madeira (Tr 2 e 4) foi observado que valores dos coeficientes de absorção nas frequências abaixo de 400 Hz, para amostras contendo as espumas poliuretanas, são maiores do que na composição sem preenchimento da camada de ar. Incrementos dos valores de α_s ocorreram principalmente nas frequências próximas à frequência de ressonância destes painéis (100 Hz). Entre 400 e 800 Hz, estes coeficientes permanecem semelhantes para as três condições. Considerando-se as altas frequências, na faixa de 3200 Hz, o preenchimento com espuma PU de mamona promoveu maior valor de α_s para os painéis Tr 4.

Oliveira (2009) cita que a introdução de materiais porosos na caixa de ar promove diminuição do pico de absorção, enquanto que a absorção sonora aumenta nas frequências próximas da frequência de ressonância. Este comportamento foi verificado nos painéis Tr 2 e Tr 4 (Figura 90).

Figura 91 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito do preenchimento da camada de ar (') com as espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras configuradas em camadas.

Para painéis contendo 100% madeira/50% borracha em camadas - Tr 6 e 8, nas frequências abaixo de 1600 Hz, a espuma PU comercial como preenchimento (6''' e 8''') resultou em maiores coeficientes de absorção sonora em relação às demais, enquanto que para a frequência de 3200 Hz, as outras condições apresentaram maiores valores de α_s .

Figura 92 - Coeficiente de Absorção Sonora: Efeito do preenchimento da camada de ar (') com espumas PU de mamona (") e comercial (") – comparativo das amostras configuradas em mistura borracha.

Para painéis contendo 100% madeira/50% borracha e configuração mistura de borracha (amostras 10 e 12), nas frequências abaixo de 800 Hz, a espuma PU comercial como preenchimento (10''' e 12''') resultou em maiores coeficientes de absorção sonora em relação às demais. Nas frequências maiores que 800 Hz, a condição camada de ar e preenchimento com espuma PU de mamona, representadas pelas amostras 10' e 12'', respectivamente, resultaram em maiores valores de α_s .

Neste sentido, foi observado que, com exceção das amostras 2 e 10, os demais painéis com o preenchimento da camada de ar apresentam curvas dos valores de absorção com

tendência semelhante, em relação as curvas das medições das espumas PU (Figura 89), ou seja, comportamento semelhante nas faixas de frequência entre 400 e 1600 Hz.

Segundo Patrício e Patraquim (2008), a utilização de material absorvedor na camada de ar pode incrementar significativamente a absorção sonora dos painéis acústicos.

Em geral, verificou-se que o preenchimento da camada de ar com as espumas PU de mamona proporcionou os maiores coeficientes de absorção em altas frequências e a espuma PU comercial resultou em maiores coeficientes nas baixas frequências. Assim, a aplicação destas composições termoacústicas dependerá muito do tratamento acústico do ambiente, favorecendo a absorção nas frequências desejadas, de sons graves (baixas frequências) ou sons agudos (altas frequências).

4.3.6.3 Comparativo de α_s das composições termoacústicas com produtos de referência

Conforme descrito no item 3.6.7, as medidas acústicas na câmara em escala de 1:5 foram realizadas nas faixas de frequências de 500 Hz a 16 kHz, equivalendo às frequências reais de 100 Hz a 3200 kHz. Para ensaios em escala real, são obtidos os tempos de reverberação para o cálculo do coeficiente de absorção, nas seis faixas de oitavas de frequências que variam de 125 Hz a 4000 Hz.

A seguir, são apresentados valores de referência, de painel comercial e de dois produtos análogos citados por norma, comparando-se com algumas montagens das composições termoacústicas do presente estudo. Os valores de referência são apresentados nas frequências de 125 Hz a 4000 Hz, e os painéis deste estudo foram relacionados com os coeficientes determinados nas frequências mais próximas.

O CELENIT AB é um painel de isolamento natural, térmico e acústico, feito a partir de fibras finas de lã de madeira de abeto vermelho, mineralizadas e ligadas com cimento Portland branco de alta resistência (ECOPLACE, 2012). O produto da norma ABNT NBR 12179 (1992) trata-se de uma chapa leve de lã de madeira. A norma IS 3308: 1981, referente a painéis de isolamento, apresenta apenas requisitos mínimos para painel de lã de madeira e cimento.

A Tabela 76 apresenta o comparativo entre estes produtos e os painéis do presente trabalho, na montagem diretamente na base da câmara.

Tabela 76 – Comparativo de composições termoacústicas com materiais para absorção sonora – painéis na base da câmara.

Produtos de Referência	Descrição	Coeficientes de absorção Sonora (α_s)					
		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Celenit AB	Painel de 25 mm, em aderência	0,08	0,11	0,18	0,5	0,8	0,72
ABNT NBR 12179 (1992)	Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, em parede rígida	0,04	0,13	0,52	0,75	0,61	0,72
IS 3308 (1981)	Painel de 25 mm em parede rígida	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5
Tratamento do Estudo	Descrição	Frequência (Hz)					
		100	200	400	800	1600	3200
2	Painel 100% Madeira, 20 mm, na base da câmara	0,37	0,46	0,55	0,69	0,81	0,84
6	Painel 100% Madeira/ 50% Borracha, 20 mm, em camadas, na base da câmara	0,18	0,27	0,33	0,44	0,59	0,65
10	Painel 100% Madeira/ 50% Borracha, 20 mm, MB, na base da câmara	0,21	0,32	0,38	0,48	0,62	0,68

Observa-se que os painéis da amostra 2 exibem maiores coeficientes de absorção em faixas de frequências de 1600Hz e 3200 Hz, do que os produtos de referência nas frequências próximas (2000 e 4000 Hz). Os tratamentos 6 e 10 (com adição de borracha), também apresentam maiores valores de α_s em relação a base da câmara, em comparação com o painel descrito na ABNT NBR 12179 (1992), para frequências abaixo de 250 Hz. Todos os tratamentos deste estudo, Tabela 76, apresentam valores acima do mínimo estabelecido pela norma IS 3308: 1981, em frequências próximas. Notou-se que as amostras deste estudo possuem maiores coeficientes em baixas frequências do que os produtos de referência, possibilitando aplicações das quais se deseja também absorção de sons graves.

Os coeficientes de absorção obtidos para o tratamento 2 (Tabela 76), de 0,37 (100 Hz) e 0,81 (1600 Hz) apresentam-se próximos a valores obtidos por Karlinasari et al. (2012). Estes autores obtiveram valores de 0,3 (100 Hz) e de 0,8 (1600 Hz) para painéis de média densidade, confeccionados com partículas de bambu e resina MDI.

A Tabela 77 apresenta o comparativo, considerando-se as montagens das composições feitas com a espuma PU à base de óleo de mamona preenchendo a caixa de ar.

Tabela 77 - Comparativo das composições termoacústicas com materiais para absorção sonora – painéis com camada de ar preenchida por material absorvente.

Produtos de Referência	Descrição	Coeficientes de absorção Sonora (α_s)					
		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Celenit AB	-Painel de 25 mm, c/ cx de ar > 40 mm e manta de lã mineral > 40 mm	0,25	0,67	1,08	0,86	1,81	1,04
ABNT NBR 12179 (1992)	Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, com espaço de 5cm preenchido de absorvente acústico	0,18	0,33	0,8	0,9	0,8	0,83
Amostra do Estudo	Descrição	Frequência (Hz)					
		100	200	400	800	1600	3200
2"	Painel 100% madeira, 20 mm, c/ cx de ar de 5cm preenchido com espuma PU de mamona	0,32	0,40	0,50	0,70	0,85	0,79
6"	Painel 100% Madeira/ 50% Borracha, 20 mm, camada, c/ cx de ar de 5cm preenchido com espuma PU de mamona	0,18	0,24	0,29	0,44	0,63	0,72
10"	Painel 100% Madeira/ 50% Borracha, 20 mm, MB, c/ cx de ar de 5cm preenchido com espuma PU de mamona	0,21	0,27	0,30	0,51	0,65	0,65

Observa-se nesta montagem que as composições termoacústicas, representadas pelas amostras 2", 6" e 10", apresentaram menores coeficientes nas frequências acima de 200 Hz, comparadas aos produtos de referência (nas frequências a partir de 250 Hz). Todavia, exibem grande potencial de aplicação, pois proporcionam considerável capacidade fonoabsorvente, com coeficientes de absorção acima de 0,5 em grande parte das frequências analisadas.

5 Conclusões

Com base na metodologia de obtenção e resultados da caracterização dos painéis e espumas poliuretanas, é possível registrar as seguintes conclusões:

- As partículas de madeira de *Pinus* sp. tratado com CCB e grânulos de borracha de pneu apresentaram características físicas apropriadas para a produção dos painéis. A distribuição granulométrica da madeira esteve compreendida entre 0,59 mm e 1,19 mm, enquanto a borracha apresentou grânulos entre 2 mm e 4 mm, ambos os materiais com baixa quantidade de finos (<6%). O teor de umidade de 9,36% das partículas de madeira esteve coerente com valor da literatura (7 a 10%), aconselhado para painéis produzidos com resinas poliuretanas, como a derivada da mamona.
- Em relação à estabilidade térmica dos painéis de partículas e das espumas poliuretanas, foram observadas temperaturas de início de degradação térmica próximas. Menor e maior estabilidade, respectivamente, foi verificada para as amostras de região de borracha e da espuma comercial. As etapas de degradação obtidas foram semelhantes às aquelas mencionadas na literatura. Possíveis liberações de componentes voláteis proveniente da queima dos materiais de origem sintética podem ser amenizadas com a montagem dos painéis sobre as espumas;
- As imagens de MEV dos painéis permitiram visualizar uma estrutura com maior número de vazios, entre os grânulos nas regiões de borracha. Nos painéis contendo somente madeira tais vazios foram visualizados em menores proporções. Para as amostras contendo borracha, em regiões de interface de camada ou regiões de mistura da madeira com borracha, foi visualizada uma adesão possivelmente mecânica entre partículas-adesivo-grânulos, pois a borracha de pneu não chegou a fundir-se na madeira.
- As imagens de MEV das espumas mostraram a estrutura da PU de mamona com grande número de células de paredes rompidas e de menor uniformidade de tamanho, em comparação com a espuma PU comercial. Este comportamento é previsto na literatura, já que se trata de materiais com diferentes agentes de expansão;
- Em relação ao ensaio de PIM dos painéis, as regiões de borracha apresentaram porosidade aproximadamente 5 vezes menor que as regiões de madeira, contrariamente ao visualizado através do MEV, devido à microestrutura porosa da madeira. Amostras com

pressão de 2,5 MPa apresentaram maior porosidade em relação à painéis prensados a 4 MPa, independente da composição ou configuração;

- A densidade aparente encontrada para a espuma PU de mamona foi maior do que a determinada para a espuma comercial, podendo estar relacionada às suas características de formulação e expansão;
- Em relação às propriedades físicas dos painéis, os teores de umidade dos tratamentos apenas com madeira encontraram-se acima do determinado para as partículas, o que pode estar relacionado às variáveis pertinentes à madeira, adesivo ou parâmetros de produção. Os painéis contendo borracha apresentaram menores teores de umidade do que os painéis sem a adição deste insumo. Os tratamentos estudados resultaram em painéis classificados como baixa, média e alta densidade, conforme a norma ANSI A208.1 (1999), apresentando valores abaixo da densidade nominal;
- Em relação às análises estatísticas de TU e D, o fator teor de borracha apresentou influência significativa nos três planejamentos experimentais. Comparando-se os painéis contendo adição de borracha nas configurações mistura e camada, a proporção de borracha, configuração e pressão foram influentes na densidade. Os fatores proporção de borracha e espessura também foram influentes no teor de umidade dos painéis.
- No inchamento em espessura, em 2 e 24 horas, todos os tratamentos estiveram em conformidade com as normas de referência. Em relação à absorção de água, os painéis também estiveram condizentes com trabalhos da literatura. Em relação às análises estatísticas, nos três planejamentos experimentais, o fator mais influente no IE foi a pressão de prensagem, enquanto para AA o teor de borracha foi o de maior influência;
- Os requisitos normativos para painéis de partículas, das propriedades MOE e MOR, foram alcançados somente para amostras de baixa densidade. Estudos análogos mostram que maior temperatura de prensagem permite a fusão da borracha e aumento destas propriedades. No entanto, este não era o objetivo do trabalho, pois se buscava estrutura mais porosa promovendo melhor desempenho térmico e acústico. Com base nas análises estatísticas, o teor de borracha influenciou nas duas propriedades, sendo diretamente proporcional ao desempenho de MOR e inversamente proporcional ao MOE;
- A resistência à tração perpendicular dos painéis esteve acima de todos os requisitos normativos neste âmbito, mostrando uma eficiente ligação interna (interação madeira-adesivo-borracha). Além disso, apresentou resultados semelhantes a painéis contendo borracha da literatura. As análises estatísticas demonstraram que, para o 3º Planejamento

Experimental, comparando-se os painéis contendo borracha nas duas configurações (camada e mistura), todos os fatores apresentaram influência nesta propriedade;

- Para a resistência ao arrancamento de parafusos, os painéis atenderam aos requisitos normativos quanto à superfície, para tratamentos de baixa densidade, e quanto ao topo, para tratamentos de média densidade. Quanto às análises estatísticas, o teor de borracha teve influência significativa apenas no 1º e 2º Planejamentos Experimentais, ou seja, comparando-se os painéis contendo borracha (independente da configuração) com aqueles apenas com madeira.
- Em relação às propriedades térmicas para determinação da capacidade de isolamento, os painéis dos tratamentos 2 (100%madeira), 10 (100%madeira/50% borracha) e 18 (100% madeira/ 75% borracha), apresentaram os melhores desempenhos de resistência térmica, dentre os tratamentos de mesma constituição de insumos. A espuma PU de mamona teve desempenho superior para a condutividade térmica e resistência térmica frente à amostra comercial. Em simulações de montagem em parede dos painéis e espuma, a transmitância térmica do conjunto esteve próxima às especificações de painel comercial para isolamento térmico.
- Em relação à propriedade de absorção sonora, as diferentes montagens dos painéis e espumas demonstraram comportamentos distintos e favoráveis na obtenção do α_s em determinadas frequências. Os principais efeitos que demonstraram influência nesta propriedade foram: a) superfície de madeira, que mostrou maior capacidade fonoabsorvente que a superfície da camada de borracha; b) painéis de 20 mm, com maiores coeficientes, principalmente em baixas frequências (100 a 200 Hz); c) menor pressão de prensagem dos painéis foi favorável para α_s principalmente em frequências superiores a 1600 Hz; d) camada de ar apresentou redução do coeficiente em baixas frequências e aumento de α_s em altas frequências; e) preenchimento da camada de ar com a espuma PU de mamona proporcionou os maiores coeficientes de absorção em altas frequências. Em comparação com produtos de referência, as composições termoacústicas apresentaram vantagens em montagens direto na base da câmara e também com preenchimento da espuma PU de mamona.
- A composição de painéis do tratamento 2, com e sem preenchimento com a espuma PU de mamona, se destacou quanto as suas propriedades de isolamento térmico e absorção sonora. No entanto, os painéis referentes aos outros tratamentos também apresentam potencial de aplicação, considerando-se também as demais propriedades abordadas neste trabalho.

Diante do exposto, conclui-se a viabilidade da utilização dos referidos painéis e espumas em composições termoacústicas. São sugeridas as disposições das espumas como material de enchimento entre os painéis e a paredes, não só pela funcionalidade do elemento construtivo, mas também por questões de segurança, como em situações de risco de incêndio.

- Recomendações para estudos futuros

As seguintes recomendações de estudos futuros são consideradas com base nas conclusões:

- Avaliar outros níveis dos fatores analisados para os painéis, como espessura e pressão de prensagem;
- Aplicar diferentes granulometrias do insumo borracha de pneu, bem como outros teores de adesivo para este insumo;
- Adoção de diferentes espessuras de camada de ar e do material de enchimento, na análise da absorção sonora;
- Aplicação das composições termoacústicas em construções, para determinações *in situ* da absorção sonora. A afirmação de melhor desempenho fonoabsorvente depende não só do produto, mas também da faixa de frequências que se pretende absorver em determinado ambiente.
- Analisar a capacidade de isolamento acústico dos painéis de partículas produzidos;
- Fabricação de novos produtos para a mesma utilização, contendo outros resíduos (lignocelulósicos ou poliméricos), adotando-se variações de constituições, como partículas e adesivo, e de dimensões do painel.

Referências

- AL-HOMOUD, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, p. 353–366.
- ALRAHMAN, L.A.; RAJA, R. I.; RAHMAN, R. A. (2013). Experimental study on natural fibers for green acoustic absorption materials. **American Journal of Applied Sciences**, v.10, n.10, p.1307-1314.
- AMARAL, J. S. et al. (2012). Fungal degradation of lignin-based rigid polyurethane foams. **Polymer Degradation and Stability**, v.97, p. 2069-2076.
- AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. (2013). Polyurethane Applications. Disponível em:<<http://polyurethane.americanchemistry.com/Introduction-to-Polyurethanes/Applications>>. Acesso em: 10 jan. 2014.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (1973). **ANSI. A194.1:** Cellulosic fiber insulating board. Washington.
- _____. (1999). **ANSI A208.1:** Particleboard. Gaithersburg.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1992). **ASTM D 1622:** Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics. Philadelphia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA. (2013). Disponível em:<<http://www.abipa.org.br/numeros.php>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). **NBR 12179:** Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro.
- _____. (2003). **NBR 15220:** Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro.
- _____. (2006). **NBR 14810:** Painéis de madeira aglomerada. Parte 3: Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro.
- _____. (2006). **NBR 14810:** Painéis de madeira aglomerada. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. (2013). Anuário estatístico ABRAF 2013, ano base 2012 / ABRAF. Brasília. 148 p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. (2014). Disponível em:<http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL – APRE. O Uso da madeira tratada na construção civil. (2011). Disponível em:

<<http://www.apreflorestas.com.br/noticias/construcao-civil/132/o-uso-da-madeira-tratada-na-construcao-civil>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

ARANGUREN, M. I.; RÁCZ, I.; MARCOVICH, N. E. (2007). Microfoams based on castor oil polyurethanes and vegetables fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.105, p. 2791–2800, 2007.

BARILLARI, C. T. (2002). **Durabilidade da madeira do gênero *Pinus* tratada com preservantes: avaliação em campo de apodrecimento**. 68f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BERTOLINI, M. S. 2011. **Emprego de resíduos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 129f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BERTOLINI, M. S. et al. (2013). Accelerated artificial aging of particleboards from residues of CCB treated *Pinus* sp. and castor oil resin. **Materials Research** (São Carlos. Impresso), v. 16, p. 293-303.mar./apr.

BERTOLINI, M. S. et al. (2014). Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus* sp. tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, v. 38, p. 339-346.

BHOWMICK, A. K.. MANGARA, D. (1994). Definition of vulcanization; what happens when rubber is vulcanized. BHOWMICK, A. K.; HALL, M. M.; BENAREY, H. A. **Rubber products manufacturing technology**. New York: Marcel Decker, Inc. Cap. 6. p. 315.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. (1982). **Mechanics of wood and wood composites: characteristics of wood composites**. New York. Van Nostrand Reinhold.

BORGES, J. C. S. (2009). **Compósito de Poliuretano de Mamona e Vermiculita para Isolação Térmica**. 80f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

BENKREIRA, H.; KHAN, A., HOROSHENKOV, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. **Chemical Engineering Science**, v. 66, p. 4157–4171, 2011.

BRITISH STANDARD. BS EN20354. (1993). **ISO 354:1985**: Acoustics – Measurements of sound absorption in a reverberation room. Londres.

BRÜEL & KJÆR. (2012). Sound & Vibration Measurement A/S. Dados do Produto, 2012.

CAMPOS, C. I. (2005). **Produção e caracterização físico-mecânica de MDF a partir de fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores**. 102f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CANGEMI, J. M. et al. (2006). Study of the biodegradation of a polymer derived from castor oil by scanning electron microscopy, thermogravimetry and infrared spectroscopy. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 2, p. 129-135.

CARDOSO, G. T. (2010). **Caracterização de espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo de mamona (*Ricinus communis*) para isolamento térmico na construção civil**. 84f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CASSENS, D. L. et al. (1995). **Selection and use of preservative-treated wood**. Madison: Forest Products Society.

CATAI, R. E.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. (2006). Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. Disponível em: <<http://hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/CienciasdoAmbiente/Semestre20101/Isolamentoacustico-materiais.pdf>>. Acesso 12 jun. 2014.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. (2014). Pneus – o mercado para reciclagem. Disponível em: <http://cempre.tecnologia.ws/ft_pneus.php>. Acesso 11 jun. 2014.

CHEUNG, T.; JANSEN, D. C.; HANSON, J. L. (2008). Engineering Controlled Low Strength Materials Using Scrap Tire Rubber. In: GEOCONGRESS 2008: pp. 622-629. 2008. Disponível em: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1143&context=cenv_fac>. Acesso em: 15 jun. 2014.

CLAUSEN, C. A.; KARTAL S. N.; MUEHL, J. (2000). Properties of particleboard made from recycled CCA-treated wood. In: ANNUAL MEETING - THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 31., Kona, Hawaii, 6 p. 2000.

CLARO NETO, S. (1997). **Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. 127f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

COSTA, E. C. (2008). **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. 4.ed. São Paulo: Blücher.

COMMERCIAL STANDARD. (1966). **CS 236: Mat-formed wood particleboard**. Gaithersburg.

CRAVO, J. C. M. (2013). **Compósito particulado de baixa densidade com casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana à base de óleo de mamona para aplicação como forro de galpões avícolas**. 166f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

DIAS, F. M. (2005). **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 178f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DIAS, F. M. (2008). Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada. ROCCO LAHR, F. A. **Produtos derivados da madeira: síntese dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, SET-EESC-USP**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 73-92.

ECOPLACE. (2012). Disponível em: < <http://www.ecoplace.pt/>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

ESHUN, J. F., POTTING, J., LEEMANS, R. (2012). Wood waste minimization in the timber sector of Ghana: a systems approach to reduce environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 26, 67-78.

EUROPEAN STANDARD. (2003) **EN 312**: Particleboards – Specifications. British Standard. English Version. Bruxelas.

EVEREST, F. A. (2001). **The master handbook of acoustics**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill.

FAO. FAOSTAT Forestry. (2012). Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>>. Acesso em: 11 Jan. 2013.

FERNANDES, J. C. (2002). **Acústica e Ruídos**. Bauru: UNESP, 2002. 98 p.

FERRO, F. S. (2013). **Painéis OSB com Madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana a base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. 97f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FIORELLI, J. et al. (2012). Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 69– 75.

FIORELLI, J. et al. (2014). Particleboards with waste wood from reforestation. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 36, n. 2, p. 251-256.

FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. R. (2004). Fabricação de blocos estruturais de concreto com resíduos de borracha de pneus. **Holos Environment**, v. 4, n. 2, p. 145-156.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. (2001). **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel.

FUNDAÇÃO ISRAEL PINHEIRO (2014). Minas sem lixões. Centro Mineiro de Referência em Resíduos. Disponível em: <<http://www.minassemblixoes.org.br/coleta-seletiva/conheca-os-residuos/pneu/>>. Acesso em: 11 jun. 2014.

GARCÍA, D. et al. (2007). Composites based on sintering rice husk–waste tire rubber mixtures. **Materials and Design**, v. 28, p. 2234–2238.

GARDIN, J. A. C.; FIGUEIRÓ, P. S.; NASCIMENTO, L. F. (2010). Logística reversa de pneus inservíveis: discussões sobre três alternativas de reciclagem para este passivo ambiental. **Revista Gestão e Planejamento**, Salvador, v. 11, n. 2, p. 232-249.

GELLERT, R. (2010). Inorganic mineral materials for insulation in buildings. HALL, M. R. **Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. Cap. 8.

GIACOBBE, S. (2008). **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus**. 105f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GHOFRANI, M.; RABIEI, A. (2008). Study of the physical and mechanical properties of composite boards made of a mixture of poplar chips and recycled tires. **Environmental Sciences**, v. 6, n. 1, p. 123-129.

GHOSH, S. K., SENGUPTA, S., NASKAR, M. (2010). Physico-mechanical properties of particle boards from agro-wastes. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v.69, p.396-400.

GODSHALL, W. D., DAVIS, J. H. (1969). **Acoustical absorption properties of wood-base panel materials**. U.S.D.A. FOREST SERVICE. Research Paper, FPL 104, may.

GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. F.; BARRIOS, M. T. (2007). Panorama da Indústria de Pneus no Brasil: Ciclo de Investimentos, Novos Competidores e a Questão do Descarte de Pneus Inservíveis. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.25, p. 107 – 130.

GONÇALVES, M. C (2004). Microscopia Eletrônica de Varredura. CANEVAROLO JR., S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber. p. 165 – 176.

GONZÁLEZ-GARCIA, S. et al. (2011). Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.445-453.

GOODYEAR TIRE AND RUBBER COMPANY. (2013). Disponível em: <<http://www.goodyear.com.br/institucional/goodyear-mundo/>>. Acesso em: 11 jun. 2014.

GU, R.; SAIN, M. M., KONAR, S. K. (2013). A feasibility study of polyurethane composite foam with added hardwood pulp. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 273– 279.

GUERREIRO, L. (2003). Comportamento de Blocos de Elastómero (Borrachas). Comportamento de materiais estruturais. Instituto Superior Técnico. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/~luig/textos/borrachaAbr03.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2014.

HAN, M. S. et al. (2009). Effects of silicone surfactant on the cell size and thermal conductivity of rigid polyurethane foams by environmentally friendly blowing agents. **Macromolecular Research**, v. 17, n. 1, p. 44-50.

HAO, A.; ZHAO, H.; CHEN, J. Y. (2013). Kenaf/polypropylene nonwoven composites: The influence of manufacturing conditions on mechanical, thermal, and acoustical performance. **Composites: Part B**, v. 54, p. 44–51.

HARIKRISHNAN, G.; UMASANKAR PATRO, T.; KHAKHAR, D. V. (2006). Polyurethane Foam - Clay Nanocomposites: Nanoclays as Cell Openers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 21, p. 7126-7134.

HATAKEYAMA, H. et al. (2012). Water absorbent polyurethane composites derived from molasses and lignin filled with microcrystalline cellulose. **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 7254 – 7261.

HEDLEY, M. E., PAGE, D. R., PATTERSON, B. E. (2000). Long term performance of CCA preservatives in ground contact. In: 31 ANNUAL MEETING - THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION. 15p.

HILLIG, E. (2000). **Qualidade de chapas aglomeradas estruturais, fabricadas com madeira de pinus, eucalipto e acácia negra, puras ou misturadas, coladas com tanino-formaldeído**. 96 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

HUANG, C., COOPER, P. A. (2000). Cement-bonded particleboards using CCA-treated wood removed from service. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 6, p. 49-56.

HUMAR, M., POHLEVEN, F. (2006). Influence of water properties on leaching of copper-based preservatives from treated wood. **Wood Research**, v.51, n.3, p. 69-76.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE – IBAMA (2007). Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/qualidadeambiental/madeira/produtos_reg_ibama.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2014.

INCROPERA F.P.; DEWITT, D.P. (1996). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 4ed. John Wiley & Sons Inc.

INDIAN STANDARD. (1965). **IS 3348**: Specification for fibre insulation boards. New Delhi.

_____. (1981). **IS 3308**: Specification for wood wool building slabs. New Delhi.

INTERNATIONAL STANDARD. (1997). **ISO 11654**: Acoustic – sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. London.

ISOLAMENTOS TÉRMICOS E ACÚSTICOS – ISAR 2014. Disponível em: <<http://www.isar.com.br/produtos/isolamento-termico>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

IWAKIRI, S. (2005). **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF.

IWAKIRI, S. et al. (2005). Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia Forestalis**, n. 68, p.39-43, ago.

JANKOWSKY, I. P., BARILLARI, C. T., FREITAS, V. P. (2002). Tratamento preservativo da madeira de *Pinus*. In: *Pinus* – uma alternativa de mercado. **Revista da Madeira**, edição especial, p.110-116.

JESUS, J. M. H. (2000). **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 106f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

JIAO, L.; XIAO, H.; WANG, Q.; SUN, J. (2013). Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, p. 2687-2696.

JUN, Z. et al. (2008). Optimization of processing variables in wood-rubber composite panel manufacturing technology. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 2384–2391.

KAKARAS, J. A. et al. (2002). Observations on the performance of CCB and creosote treated fence posts after 18 years of exposure in Greece. In: THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION ANNUAL CONFERENCE, 33, 2002, Cardiff. Disponível em: <<http://users.teilar.gr/~kakar/observations-performance-CCB-creosote-treated-fences.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

KAMDEM, D. P. 2002. Options for recycling treated wood in composites. Disponível em: <http://legacy.forestprod.org/Kamdem.pdf>. Acesso em: 01 set. 2012.

KAMDEM, D. P. et al. (2004). Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n.3, p. 347 – 355, mar.

KARLINASARI, L. et al. (2012). Acoustical properties of particleboards made from Betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, v. 7, n. 4, p. 5700-5709.

KHEDARI, J. et al. (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. **Building and Environment**, v. 39, p. 59 – 65.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. (1975). **Principles of wood science and technology: 2 - wood based materials**. New York: Springer-Verlag.

KOWALUK, G.; FUCZEK, D. (2010). Screw holding performance of panels made of fibrous chips. **Drewno**, v. 53, n. 184, p. 77-81.

KOWALUK, G. et al. (2013). Particleboards engineered through separate layer bonding. **Wood Research**, v. 58, n. 2, p. 265-274.

KUMAR, S. K.; THOMAS, S.; GROHENS, Y. (2013). Recents advances in rubber recycling a review. GROHENS, Y.; KUMAR, S. K.; BOUDENNE, A. **Recycling and reuse of materials and their products**. Oakville: Apple Academic Press Inc. Cap. 5, p. 53-86.

LAGARINHOS, C. A. F., TENÓRIO, J. A. S. (2008). Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, v.18, n. 2, p.106-118.

LEBOW, S. (2006). Preservative treatments for building components. BARNES, H. M. **Wood protection**. Wisconsin: Forest Products Laboratory. Session I, p. 57 – 64.

_____. (2010). Wood Preservation. **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin.

LEPAGE, E. S. (2010). Moq® 0x 50 (CCB-O) – Preservativo sustentável com longo histórico de eficiência. **Referência**, p. 80 - 83.

Disponível em: <<http://www.montana.com.br/Noticias/Clippings/Revista-Referencia-Segunda-Feira-20-de-Setembro-de-2010>>. Acesso em: 11 set.12.

LERTSUTTHIWONG, P. et al. (2008). New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4841–4845.

LI, W.; SHUPE, T. F.; HSE, C. Y. (2004). Leaching of flakeboard produced from recycled CCA-treated wood into deionized water. **Forest Products Journal**, v. 54, n.3, p.38-41.

LINDT, J. W. et al. (2008). Application and feasibility of coal fly ash and scrap tire fiber as wood wall insulation supplements in residential buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, v.52, p.1235–1240.

LOPES, E. M. L. (2009). **Desempenho térmico da espuma poliuretana a base de óleo de mamona utilizada em componentes da edificação (subcoberturas): estudo em Ilha Solteira, SP**. 198f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

LUAMKANCHANAPHAN, T.; CHOTIKAPRAKHAN, S.; JARUSOMBATI, S. (2012). A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. **APCBEE Procedia**, v. 1, p. 46 – 52.

MACEDO, D. G. (2008). **Compósitos de serragem de madeira e resíduos de recauchutagem de pneu**. 144f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MACEDO, L. B. (2014). **Painéis OSB de madeira *Pinus* sp. e adição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP)**. 84p. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MACIEL, A. S. (2001). **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. 121f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MAHZAN, S. et al. (2010). Study on sound absorption properties of coconut coir fibre reinforced composite with added recycled rubber. **International Journal of Integrated Engineering**, v.2, n.1, p. 29-34.

MALONEY, T. M. (1977). **Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman.

MARTINS, I. R. F. (2005). **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. 132f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.

MARTINS, G. V. C. P. (2008). **Caracterização acústica de materiais fonoabsorventes à base de filmes de polímero monocomponentes sobre lâ mineral fibrada**. 132p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

- MATA, V. L. G. (1998). **Caracterização de meios porosos: porosimetria, modelização 3D e tomografia seriada – Aplicação a suportes catalíticos**. Tese (Doutorado) – Universidade do Porto, Porto, 1998.
- MATOS, J. R.; MACHADO, L. D. B. (2004). Análise térmica – Termogravimetria. CANEVAROLO JR., S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber. p. 209 – 228.
- MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M. (2008). Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar.
- MONTANA QUÍMICA. (2010). Informativo Técnico Divisão Osmose – Destinação Final de Madeira Tratada com CCA. Disponível em:< www.montana.com.br>. Acesso em: 13 jan. 2014.
- MOREIRA, K. M. C. (2009). **Avaliação de propriedades fono-absorventes de materiais para painéis de revestimento**. 86f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- MORESCHI, J. C. Produtos Preservantes de Madeira. Curitiba: UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais, 31p. (s.d.).
- MORESCHI, J. C. (2010). **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 176p.
- MOSLEMI, A. A. (1974). **Particleboard**. London: Southern Illinois University Press, 1974.
- MOSIEWICKI, M. A. et al. (2009). Polyurethane foams obtained from castor oil-based polyol and filled with wood floor. **Journal of Composite Materials**, v.43, n.25, p.3057-3072.
- MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. (2002). Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus*. **Silva Lusitana**, v.10, n.2, p. 207 - 216.
- MURPHY, R. J. et al. (2004). Preservative-treated wood as a component in the recovered wood stream in Europe — a quantitative and qualitative review. In: 35 ANNUAL MEETING - THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION. 21p.
- MUTLU, H., MEIER, M. A. R. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v.112, n.1, p.10-30.
- NAKAMURA, J. (2006). Conforto acústico. **Téchne**, 106ª Ed., Ano XIV, p.44-47.
- NASCIMENTO, M. F. (2003). **CPH - Chapas de Partículas Homogêneas: madeiras do nordeste do Brasil**. 117f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- NASCIMENTO, M. F. et al. (2013). Painéis de partículas homogêneas fabricados com espécies de manejo da região da Caatinga do Brasil. **Construindo**, v. 5, p. 1-10.

NARINE S. S. et al. (2007). Physical properties of polyurethanes produced from polyols from seed oils: II. Foams. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v.84, n.1, p.65-72.

NAVROSKI, M. C. et al. (2010). Avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas. **Ciência da Madeira**, v.1, n.1, p.41-51.

NEHDI, M.; KHAN, A. (2001). Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd24/cementi.pdf>>. Acesso 10 out. 2012.

OLIVEIRA, P. D. P. S. (2009). **Desenvolvimento e caracterização acústica de elementos autoportantes para absorção sonora em espaços tipo open space**. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Porto, 2009.

OLIVEIRA, M. C. R. (2010). **Compósito de Poliuretano de Mamona e Resíduo Industrial para Isolação Térmica e Absorção Sonora**. 77f. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

OLIVEIRA, E. C.; TEODORO, E. B. (2005). Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora. In: 15th Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia. Trabalhos técnicos. Uberlândia: FEMEC/UFU.

PAES, J. B. et al. (2011). Qualidade de chapas de partículas de *Pinus elliottii* coladas com resina poliuretana sob diferentes combinações de pressão e temperatura. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 551-558, jul.-set.

PAIVA, A. et al. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. **Energy and Buildings**, v.45, p. 274–279.

PAN, Z. et al. (2007). Physical properties of thin particleboard made from saline eucalyptus. **Industrial Crops and Products**, v. 26, p.185–194.

PAPADOPOULOS A. N. et al. (2002). Isocyanate Resins for Particleboard: PMDI vs EMDI. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 60, n. 2, p. 81-83.

PATRÍCIO, J.; PATRAQUIM, R. (2008). Avaliação experimental da absorção sonora em painéis de madeira. In: VI CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA – FIA, 2008, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires. p.1-10.

PEREIRA, A. F.; CARVALHO, L. S. C.; PINTO, A. C. O. (2010). Resíduo de madeira: limites e possibilidades de seu uso como matéria-prima alternativa. 2010. In: 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, São Paulo - Brasil. Disponível em: <<http://blogs.anhembi.br/congressodesign/anais/artigos/69847.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2014.

PEREIRA, B. L. C. et al. (2013). Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.567-576.

PIAO, C. et al. (2009). Glue-Line Bonding Performance of Decommissioned CCA-Treated Wood. Part II: Retreated with CCA. **Forest Products Journal**, v.59, n.10, p.31-39.

PIAO, C., MONLEZUN, C. J. (2010) Laminated Crossarms Made from Decommissioned Chromated Copper Arsenate-Treated Utility Pole Wood. Part I: Mechanical and Acoustic Properties. **Forest Products Journal**, v.60, n.2, p. 157-165.

PIAO, C. ET AL. (2010). Laminated Crossarms Made from Decommissioned Chromated Copper Arsenate-Treated Utility Pole Wood. Part II: Preservative Retention, Glue-Line Shear, and Delamination. **Forest Products Journal**, v. 60, n.7-8, p.659-667.

PIAO, C. et al. (2011a). Recycling of Pentachlorophenol- Treated Southern Pine Utility Poles. Part I: Preservative Retention and Mechanical Properties. **Forest Products Journal**, v.61, n.1, p. 38-45.

PIAO, C. et al. (2011b). Recycling of Pentachlorophenol-Treated Southern Pine Utility Poles. Part II: Mechanical and Delamination Properties of Laminated Beams. **Forest Products Journal**, v.61, n.7, p. 517-525.

PINHEIRO, R. V. (2001). **Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira**. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

POLL, B J. (2009). **Análise da isolamento acústica em parede de habitação popular executada com resíduos de pneus**. Santa Maria. 90f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

POLIURETANO – Tecnologia e Aplicações (2012). Fischer desenvolve Casa Modular com PU ecológico aprovado pela Caixa. Ano X, n. 51, p. 24-25, out./nov. 2012. Disponível em: <<http://issuu.com/editoradoadministradorltda/docs/pu51>>. Acesso em: 07 jul. 2014.

RAUBER, R. (2011). **Caracterização de Painéis Aglomerados com Madeira de Eucalipto e Sólidos Granulares de Poliuretano**. 86f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

REVISTA SISTEMAS PREDIAIS. (2011). Isolamento termo-acústico promove eficiência e reduz custos com energia. Disponível em: <http://www.wdbnet.com/grupo_wdb/artigo07.asp?m=6&s=1&i=1>. Acesso em: 12 mai. 2014.

REZENDE, C. M. F. et al. (2001). Estudo experimental do poliuretano de óleo de mamona (*Ricinus communis*) como substituto parcial do tendão calcâneo comum em coelhos (*Oryctolagus cuniculus*). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.53, n.6, p.695-700, Ago.

RICHARDSON, B. A. (1993). **Wood preservation**. 2.ed. London: Chapman and Hall.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. (2014). ECOHOUSE – A Casa Ambientalmente Sustentável. 4.ed. Porto Alegre: Bookman.

ROCCO LAHR, F. A, FERNANDES, R., BERTOLINI, M. S. (2010). Influência da preservação CCB na dureza da madeira de *Pinus* sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 19, 2010, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão: [s.n.]. CD-ROM.

RODRIGUES, M. R. P. (2008). **Caracterização e utilização do resíduo da borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicáveis na construção civil**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 252p. São Carlos, São Paulo, 2008.

ROSA, J. (2012). Portal Terra Sustentabilidade. Associação cria selo para expandir o uso de madeira tratada. 2012. Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/ciencia/sustentabilidade/associacao-cria-selo-para-expandir-o-uso-de-madeira-tratada,900939160467b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 07 jul. 2014.

SAIWARI, S. (2013). **Post-consumer tires back into new tires: de-vulcanization and re-utilization of passenger car tires**. 179f. 2013. Tese (Doutorado) - University of Twente, Enschede, 2013.

SAINT-MICHEL, F., CHAZEAU, L., CAVAILLÉ J. (2006). Mechanical properties of high density polyurethane foams: II Effect of the filler size. **Composites Science and Technology**, v.66, n.15, p.2709–2718.

SANTOS, C. (2011). **Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços: métodos e desenvolvimentos**. 179f. Tese (Doutorado na área de concentração de Arquitetura e Construção) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SANTOS, J. L. P. (2005). **Estudo do potencial tecnológico de materiais alternativos em absorção sonora**. Santa Maria: Editora UFSM.

SANTOS NETO, N. A. (2006). **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 127f. Dissertação (Mestrado). Área de Concentração da Construção Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SANTOS, W. L. F. et al. (2014). Particleboard manufactured from Tauari (*Couratari oblongifolia*) wood waste using castor oil based polyurethane resin. **Materials Research**. São Carlos. Feb. 18, 2014. In print. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392014000300017&script=sci_arttext>. Acesso em: 25 jun. 2014.

SANTOS, W. N. (2005). Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - O método de pulso de energia. **Cerâmica**, v.51, n.319, p.205-213.

SANTOS, W. N. (2011). Propriedades térmicas dos materiais poliméricos. Projeto de Pesquisa, Processo: 11/02943-4. Biblioteca Virtual FAPESP. Disponível em: <http://www.bv.fapesp.br/pt/pesquisa/?sort=-data_inicio&selected_facets=id_pesquisador_exact%3A5632>. Acesso em: 10 dez. 2012.

SANTOS, C., BERTOLI, S. R. (2009). Tópicos construtivos de câmara reverberante em escala e problemas encontrados em ensaios de absorção. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal, 9p.

SARTORI, D. L. et al. (2012). Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 171-178, abr./jun.

SERVES, V. (2007). **Espumas flexíveis de poliuretano à base de polióis de óleo de mamona etoxilado**. 72f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SEDDEQ, H. S. (2009). Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v.3, n.4, p. 4610-4617.

SEMPLE, K. E. et al. (2014). Reinforced-core particleboard for improved screw-holding ability. **Wood and Fiber Science**, v. 46, n. 1, p. 48-64.

SIDDIQUE, R., NAIK, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. **Waste Management**, v. 24, n. 6, p. 563-569.

SILVA, R. V. (2003). **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 139f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, J. C. (2006). Madeira preservada: os impactos ambientais. **Revista da Madeira**. 2006. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

SILVA, D. A. L. (2012). **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 207F. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SIMÕES, F. M. (2011). **Acústica Arquitetônica**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA. 123f.

SINDUSCONSP – Sindicato da Construção. Setor vê perigo na madeira tratada. **Notícias da Construção**. n. 89, ano 7, maio 2010. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/userfiles/noticias/cbcsnaimprensa/240610_Noticias-da-construcao_setor-ve-perigo-em-madeira-tratada.pdf>. Acesso em: 05 jun.2012.

SONG, X.M.; HWANG, J. Y. (2001). Mechanical properties of composites made with wood fiber and recycled tire rubber. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 5, p. 45-51, mai.

STEFANI, P. M. et al. (2005). Thermogravimetric analysis of composites obtained from sintering of rice husk-scrap tire mixtures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 81, p. 315–320.

SZYCHER, M. (2012). **Szycher's handbook of polyurethanes**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press – Taylor & Francis Group.

TEIXEIRA, M. G.; CÉSAR, S. F. (2006). Produção de compósito com resíduo de madeira no contexto da ecologia industrial. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. Anais... São Carlos: CEVEMAD/UNESP – IBRAMEM, 2006. Disponível em: <http://portal.faculdadedacidade.edu.br/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=7&Itemid=290>. Acesso em: 04 jul. 2014.

THOEMEN, H.; IRLE, M.; SERNEK, M. (2010). **Wood Based Panels: An Introduction for Specialists**. London: Brunel University Press.

TOMASELLI, I. (2000). Tendências de mudanças na indústria de painéis. **Revista da Madeira**, p. 36-40.

TORRELL, R. et al. (2013). Influência da adição de serragem nas propriedades tecnológicas de painéis de madeira aglomerada de *Pinus taeda*. **Ambiência**, v.9 n.1 p. 57 - 72 jan/abr.

TRIANOSKI, R. (2010). **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 260f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VALCÁRCEL, A. I. G. et al. (2004) Influence of leaching medium and drying time between successive leaching periods on the emission of chromium, copper, and boron from treated wood. **Environmental Toxicology and Chemistry, Brussels**, v. 23, n. 11, p. 2682–2688.

VARANDA, L. D. (2012). **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas de Eucalyptus grandis confeccionados com adição de casca de aveia**. 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

VARANDA, L. D. et al. (2013). Oat hulls as addition to high density panels production. **Materials Research**, v.16, n.6, p. 1355-1361.

VAUGHAN, B. R. et al. (2011). Effect of Vegetable-Based Polyols in Unimodal Glass-Transition Polyurethane Slabstock Viscoelastic Foams and Some Guidance for the Control of Their Structure–Property Behavior. I. **Journal of Applied Polymer Science**, v.119, p. 2683–2697.

VIANNA, W. L.; CORREA, C. A.; RAZZINO, C. A. (2004). Efeitos do Tipo de Poliestireno de Alto Impacto nas Propriedades de Compósitos Termoplásticos com Farinha de Resíduo de Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 339-348.

VICK, C. B.; GEIMER, R. L.; WOOD, J. E. (1996). Flakeboards from recycled cca-treated southern pine lumber. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 11-12, p. 89-91.

VILAR W. D. (2004). **Qumica e Tecnologia de Poliuretanos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria.

XU, M., LI, J. (2012). Effect of adding rubber powder to poplar particles on composite properties. **Bioresource Technology**, v.118, p. 56–60.

WANG, G.; ZHOU, A. (2011). Soy protein based biodegradable flexible polyurethane foam. **Advanced Materials Research**, v. 152-153, p. 1862-1865.

WANG, Y. et al. (2013). Influences of roce hull in polyurethane foam on its sound absorption. **Polymer Composites**, v. 34, n. 11, p. 1847-1855.

WASTE & RESOURCES ACTION PROGRAMME – WRAP. (2006). **The Composition of a Tyre: Typical Components**. Project code: TYR0009-022006. 2006. 5p. Disponível em: <<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf>>. Acesso em 12 fev, 2014.

WESTPHAL, F. S.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS R. (2001). Isolantes térmicos e acústicos para a construção civil. Disponível em: <<http://www.labcon.ufsc.br/anexosg/243.pdf>>. Acesso 25 fev. 2014.

ZHAO, J. et al. (2010). Sound insulation property of wood–waste tire rubber composite. **Composites Science and Technology**, v.70, p.2033–2038.

ZHENG, Y. et al. (2006) Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. **Industrial Crops and Products**, v. 23, p. 318–326.

ZHOU, X. et al. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1070–1074.

ZHU, M. et al. (2012). Reinforcement of Soy Polyol-Based Rigid Polyurethane Foams by Cellulose Microfibers and Nanoclays. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 124, 4702–4710.

APÊNDICE A – Análise estatística

Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA

Tabela 78 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 1º Planejamento Experimental (painéis com mistura de borracha *versus* painéis contendo somente madeira).

P-valor	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h	TU	ρ
<i>Anderson-Darling</i>	0,188	0,19	0,13	0,348	0,732	0,244
<i>Bartlett</i>	0,213	0,463	0,94	0,868	0,856	0,389
<i>Levene</i>	0,348	0,45	0,871	0,835	0,898	0,489
P-valor	MOR	MOE	RTP	RA_{sup}	RA_{top}	
<i>Anderson-Darling</i>	0,134	0,642	0,102	0,114	0,389	
<i>Bartlett</i>	0,389	0,22	0,937	0,468	0,533	
<i>Levene</i>	0,489	0,52	0,777	0,478	0,735	

Tabela 79 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 2º Planejamento Experimental (painéis com borracha em camada × painéis contendo somente madeira).

P-valor	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h	TU	ρ
<i>Anderson-Darling</i>	0,401	0,204	0,149	0,188	0,505	0,192
<i>Bartlett</i>	0,616	0,314	0,481	0,235	0,155	0,353
<i>Levene</i>	0,769	0,771	0,565	0,557	0,554	0,14
P-valor	MOR	MOE	RTP	RA_{sup}	RA_{top}	
<i>Anderson-Darling</i>	0,448	0,797	0,568	0,455	0,573	
<i>Bartlett</i>	0,27	0,648	0,644	0,687	0,209	
<i>Levene</i>	0,41	0,781	0,922	0,701	0,153	

Tabela 80 - Resultados do teste de normalidade e de homogeneidade de variâncias para os resíduos da ANOVA – 3º Planejamento Experimental (painéis com mistura de borracha × painéis com borracha em camada).

P-valor	IE-2h	IE-24h	AA-2h	AA-24h	TU	ρ
<i>Anderson-Darling</i>	0,346	0,067	0,235	0,666	0,939	0,32
<i>Bartlett</i>	0,18	0,539	0,168	0,424	0,73	0,149
<i>Levene</i>	0,277	0,727	0,052	0,698	0,76	0,079
P-valor	MOR	MOE	RTP	RA _{sup}	RA _{top}	
<i>Anderson-Darling</i>	0,442	0,099	0,106	0,344	0,084	
<i>Bartlett</i>	0,35	0,461	0,643	0,881	0,796	
<i>Levene</i>	0,238	0,635	0,602	0,851	0,867	

Resultados representados por gráficos da análise dos resíduos para validação da ANOVA, conforme a variável resposta (propriedade) e planejamento experimental.

Figura 93 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [1º Planejamento Experimental].

Figura 94 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [1º Planejamento Experimental].

Figura 95 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [1º Planejamento Experimental].

Figura 96 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [1º Planejamento Experimental].

Figura 97 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [1º Planejamento Experimental].

Figura 98 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a ρ [1º Planejamento Experimental].

Figura 99 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [1º Planejamento Experimental].

Figura 100 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [1º Planejamento Experimental].

Figura 101 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [1º Planejamento Experimental].

Figura 102 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [1º Planejamento Experimental].

Figura 103 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [1º Planejamento Experimental].

Figura 104 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [2º Planejamento Experimental].

Figura 105 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [2º Planejamento Experimental].

Figura 106 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [2º Planejamento Experimental].

Figura 107 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [2º Planejamento Experimental].

Figura 108 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [2º Planejamento Experimental].

Figura 109 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a ρ [2º Planejamento Experimental].

Figura 110 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [2º Planejamento Experimental].

Figura 111 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [2º Planejamento Experimental].

Figura 112 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [2º Planejamento Experimental].

Figura 113 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [2º Planejamento Experimental].

Figura 114 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [2º Planejamento Experimental].

Figura 115 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-2h [3º Planejamento Experimental].

Figura 116 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o IE-24h [3º Planejamento Experimental].

Figura 117 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-2h [3º Planejamento Experimental].

Figura 118 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a AA-24h [3º Planejamento Experimental].

Figura 119 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o TU [3º Planejamento Experimental].

Figura 120 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a ρ [3º Planejamento Experimental].

Figura 121 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOR [3º Planejamento Experimental].

Figura 122 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para o MOE [3º Planejamento Experimental].

Figura 123 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RTP [3º Planejamento Experimental].

Figura 124 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPsup [3º Planejamento Experimental].

Figura 125 - Resultados do teste de normalidade (a), homogeneidade (b) e independência dos resíduos (c) da ANOVA para a RAPtop [3° Planejamento Experimental].