



**Universidade de Brasília - UnB**

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUUnB

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPG/FAUUnB

**ACÚSTICA DE SALAS E BAMBU LAMINADO COLADO: ENSAIOS DE PAINÉIS  
PARA CONDICIONAMENTO ACÚSTICO.**

**Brunno Guilherme Barbosa de Sá**

Brasília/DF

2014

---

BRUNNO GUILHERME BARBOSA DE SÁ

Dissertação

**ACÚSTICA DE SALAS E BAMBU LAMINADO COLADO: ENSAIOS DE PAINÉIS  
PARA CONDICIONAMENTO ACÚSTICO.**

---

Brasília/DF  
Agosto de 2014



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

---

**ACÚSTICA DE SALAS E BAMBU LAMINADO COLADO: ENSAIOS DE PAINÉIS  
PARA CONDICIONAMENTO ACÚSTICO.**

BRUNNO GUILHERME BARBOSA DE SÁ  
Arquiteto e Urbanista

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação – Curso de Mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração em Técnicas e Processos de Produção do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. PhD. Jaime Gonçalves de Almeida.  
Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Ma. Maria Luiza Ulhôa de Carvalho.



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: Brunno Guilherme Barbosa de Sá

Título: Acústica de salas e bambu laminado colado: ensaios de painéis para condicionamento acústico.

**Dissertação defendida e aprovada em 12/09/2014, pela banca examinadora:**

---

**Prof. Dr. Jaime Gonçalves de Almeida**  
Universidade de Brasília – UnB

---

**Prof. Dr. Sérgio Luiz Garavelli**  
Universidade Católica de Brasília – UCB

---

**Prof. Dr. Divino Eterno Teixeira**  
Laboratório de Produtos Florestais – MMA/SFB

*“A mente que se abre a uma ideia, jamais voltará ao seu tamanho original”.*

Albert Einstein

**PARA**

Todos aqueles que fizeram parte desta pesquisa, todos que me apoiaram, todos que acreditaram e fizeram com que a ideia se tornasse realidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos que fizeram parte da equipe que tornou aquela simples ideia inicial em uma pesquisa concreta, incentivando e acreditando que a parceria é o caminho para se alcançar quaisquer objetivos desejados.

Aos meus pais, Gilberto Barbosa de Sá e Nilcéa Fátima Barbosa de Sá, pelo apoio fundamental ao desenvolvimento dos meus estudos e dedicação durante toda minha vida.

Ao meu orientador, Jaime Gonçalves de Almeida, que me apresentou à pesquisa no campo da arquitetura desde a graduação, com o projeto Cantoar/FAUUnB, até a vida profissional, com o CPAB/UnB, ensinando lições imprescindíveis para meu desenvolvimento enquanto pesquisador e arquiteto. Agradeço, também, pelo comprometimento e o apoio para introduzir esse material, que tanto estudamos durante os últimos cinco anos, no campo da acústica e tornar àquela primeira ideia um novo campo de desenvolvimento de pesquisas.

À minha co-orientadora Ma. Maria Luiza Ulhôa de Carvalho, por todas orientações valiosas e apoio à pesquisa, que engrandeceram meus conhecimentos na área de acústica e contribuíram para o desenvolvimento do trabalho, com comprometimento e atenção aos detalhes, fundamental para o alcance do modelo experimental do protótipo do painel de bambu laminado colado.

À equipe do Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais, André Crispim, Ana Cristina Magalhães, Átila Mendes, Maria Betânia de Oliveira Bezerra, Ivanice Cardoso e Leila Pimenta de Souza, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto dos protótipos, e principalmente ao diretor do Centro e orientador, Jaime Gonçalves de Almeida, por ceder o material necessário à confecção das peças para ensaio; e à equipe da Oficina de Marcenaria do CPAB, Antônio Francisco de Brito, Edimar Ferreira da Costa, João Dias Sousa, Jonatas Pereira da Silva, e principalmente José Alfredo de Moura Júnior, pela dedicação e paciência prestada à execução dos protótipos, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Sérgio Luiz Garavelli e ao Prof. Daniel Richard Sant'Ana, pelas valiosas contribuições à pesquisa e também pela ilustre participação no exame do projeto de dissertação.

Ao Engenheiro Florestal Dr. Divino Eterno Teixeira, pelo o apoio e acesso ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, fundamental

para determinação das características físico-mecânicas do bambu laminado colado produzido pelo CPAB/UnB.

Ao PPG-FAUUnB, pelo apoio prestado para solicitação de parceria com a UFSM e pelo transporte das peças confeccionadas pelo CPAB/UnB ao Laboratório de Acústica da EAC/UFSM.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dinara Paixão, pelo interesse na proposição do bambu laminado colado, pela contribuição ao desenvolvimento da pesquisa e pelo apoio do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria.

Ao Prof. Dr. Marco Antônio Pinheiro, pelo grande interesse por este trabalho, com o apoio do Laboratório de Acústica da EAC/UFSM para a realização dos ensaios em câmara reverberante e pelo tempo disponibilizado para auxílio a esta pesquisa, sempre prestativo e atencioso. Agradeço pela ótima recepção em Santa Maria, assim como pela disponibilização dos equipamentos e conhecimento, fundamental para a realização dos ensaios desta pesquisa.

A equipe do Laboratório de Acústica de EAC/UFSM, Eder Luiz Filipetto, José Luiz Guerra e Juraci Bortoluzzi, pelo auxílio para manipulação dos protótipos, sempre prestativos, cuidadosos e com um ótimo humor, se tornaram parte indispensável para a realização dos ensaios no laboratório.

A colega arquiteta Graziella Radavelli, por ceder a lâ de vidro para os ensaios em câmara reverberante, enriquecendo o protótipo desenvolvido e com a obtenção de novas características para o modelo experimental.

Aos funcionários e membros do Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, pelo ótimo trabalho que têm feito nesta instituição, e ao coordenador do Programa de Pós-Graduação Márcio Augusto Roma Buzar, pelo grande apoio aos alunos.

A todos os meus amigos e amigas, agradeço pelos incentivos, que por meio de nossos frequentes encontros me ajudaram a desenvolver meus conceitos e minhas ideias, sempre proporcionando diversão e crescimento, ajudando imensamente nos momentos calmos e conturbados.

Por fim, gostaria de agradecer imensamente a todos que de alguma forma fizeram parte desta pesquisa, lembrando que cada um foi uma parte vital para alcançar o objetivo final deste trabalho. Muito Obrigado.

## RESUMO

Trata-se do estudo das possibilidades de uso do Bambu Laminado Colado (BaLC) a partir da espécie *Dendrocalamus giganteus* visando o condicionamento acústico de salas. O foco da pesquisa é o coeficiente de absorção sonora do material, com vistas ao uso do BaLC como membrana ressonante para absorção sonora de baixas frequências (entre 50 e 200Hz), na configuração de placas de 107 x 107cm e cavidade de ar interna variável, com 100, 75, 50, 25mm de espessura. Para cada espessura de cavidade de ar foi calculada a frequência de ressonância do sistema, de modo a estimar a banda de frequência em que ocorre a absorção sonora máxima. Foram fabricados 12 protótipos, utilizando a membrana de BaLC e estrutura em madeira, com 1m<sup>2</sup> de área de absorção por painel, totalizando 12m<sup>2</sup> para ensaio. Esses dispositivos de absorção sonora foram ensaiados em câmara reverberante de acordo com a norma internacional ISO 354:2007 e, para tanto, foram feitos nove ensaios de coeficiente de absorção sonora para o material, os quais incluíram os tratamentos para as cavidades de ar vazia, preenchida com lã de vidro, o BaLC como revestimento (sem cavidade de ar) e o material lã de vidro. Para tanto os ensaios foram executados com as cavidades vazias de 100mm (ensaio BE100); 75mm (ensaio BE075); 50mm (ensaio BE050); 25mm (ensaio BE025), sem cavidade (ensaio BE000); com cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm de espessura e cavidade de 100mm (ensaio BEL100); 75mm (ensaio BEL075) e 50mm (ensaio BEL050) e, por fim, a lã de vidro separadamente, para comparação com as especificações do fabricante (ensaio LAV050). Nos resultados dos ensaios observou-se que o coeficiente de absorção sonora máximo ocorreu em 100Hz, ou seja, a frequência de ressonância observada nos ensaios, para as cavidades vazia e preenchida com lã de vidro e espessura de 100, 75 e 50mm, enquanto que o BaLC como revestimento (apenas a chapa sem cavidade de ar) apresentou pouca absorção nas baixas frequências e um discreto coeficiente de absorção para as altas frequências. Os coeficientes de absorção sonora na frequência de ressonância que o sistema proporcionou variaram de 0,387 a 0,778.

**Palavras chave:** acústica arquitetônica, coeficiente de absorção sonora, membranas ressonantes, tempo de reverberação, *Dendrocalamus giganteus*.

## ABSTRACT

It is the study of the possibilities of using Glued Laminated Bamboo (BaLC) from the species *Dendrocalamus giganteus* aiming acoustic conditioning rooms. The research focus is the sound absorption coefficient of the material, with a view to using the BaLC as resonant sound absorption membrane for low frequency (50 to 200Hz), the configuration of plates of 107 x 107cm and variable internal air cavities such as, 100, 75, 50 and 25mm thick. For each thickness of air cavity, the resonant frequency of the system was estimated to find in which frequency band occurs the maximum sound absorption. Twelve prototypes were fabricated using the membrane from BaLC and wooden structure, with 1,0m<sup>2</sup> of absorption area per panel, totaling 12m<sup>2</sup> for testing. These materials were tested for sound absorption in a reverberation chamber in accordance with International Standard ISO 354:2007 and, therefore, were performed nine tests of sound absorption coefficient for the material included treatments for cavities with empty air, filled with glass wool, the BaLC as coating (no air cavity) and glass wool material. The assays were performed with empty cavities of 100mm (BE100 test); 75mm (BE075 test); 50mm (BE050 test); 25mm (BE025 test) without recess (BE000 test); cavity filled with glass wool with 50 mm thick and 100mm cavity (BEL100 test); 75mm (BEL075 test) and 50mm (BEL050 test) and, finally, the glass wool separately for comparison with the manufacturer's specifications (LAV050 test). In the results of the tests it was observed that the maximum coefficient of sound absorption occurred at 100Hz, that is the resonance frequency observed in the tests for the empty cavities, filled with glass wool and a thickness of 100, 75 and 50mm, whereas BaLC as the coating, only the plate without air cavity, showed little absorption low at low frequencies and discrete absorption coefficient for the high frequencies. The sound absorption coefficients at the resonance frequency of the system provided ranged from 0.387 to 0.778.

**Keywords:** architectural acoustics, sound absorption coefficient, resonant membranes, reverberation time, *Dendrocalamus giganteus*.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	iv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xv
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>CAPÍTULO I – REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	06
<b>1.1. Propriedades do som</b> .....	07
1.1.1. Conceito do som .....	07
1.1.2. Propagação do som .....	08
1.1.3. Frequência .....	08
1.1.4. Onda acústica .....	09
1.1.5. Velocidade do som no ar e outros meios .....	11
1.1.6. Intensidade sonora .....	12
1.1.7. Propagação do som em recintos fechados.....	14
1.1.8. Reflexão, transmissão e absorção .....	14
<b>1.2. Acústica de salas</b> .....	16
1.2.1. Tipos de fontes sonoras .....	16
1.2.2. Parâmetros de qualidade acústica .....	18
1.2.2.1. Tempo de reverberação .....	18
1.2.2.2. Fórmula de Sabine .....	20
1.2.3. Parâmetros subjetivos de qualidade acústica .....	22
1.2.4. Coeficiente de absorção sonora .....	22
1.2.5. Sistemas sonoros absorventes .....	23
1.2.6. Materiais fibrosos e porosos .....	24
1.2.7. Membranas ressonantes .....	26
1.2.8. Ressonadores .....	32
1.2.9. NRC .....	33
<b>1.3. O bambu: características naturais e construtivas</b> .....	34
1.3.1. Distribuição geográfica .....	35
1.3.2. Aspectos morfológicos e anatômicos .....	36
1.3.3. Propriedades químicas, físicas e mecânicas .....	42
1.3.4. Aspectos ambientais .....	46

1.3.5. Usos e aplicações do bambu .....	49
<b>1.4. O bambu laminado colado (BaLC) .....</b>	<b>52</b>
1.4.1. O sistemas de ripas aplicado ao bambu .....	53
1.4.2. Os painéis em bambu laminado colado .....	55
1.4.3. Os adesivos .....	58
1.4.4. Processo de fabricação do <i>Plybamboo</i> .....	61
 <b>CAPÍTULO II – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	
<b>2.1. A proposta de sistema de absorção sonora em BaLC .....</b>	<b>64</b>
2.1.1. A espécie de bambu utilizada .....	64
2.1.2. O sistema de absorção escolhido .....	65
2.1.3. Desenvolvimento e caracterização da proposta .....	65
2.1.4. A lã de vidro .....	79
<b>2.2. Execução do protótipo .....</b>	<b>80</b>
2.2.1. Local de confecção do BaLC .....	81
2.2.2. Fatiamento do bambu .....	83
2.2.3. Ripamento do bambu .....	84
2.2.4. Secagem das ripas .....	85
2.2.5. Ensaio de teor de umidade das ripas .....	86
2.2.6. Colagem das ripas finalizadas .....	89
2.2.7. Montagem do protótipo .....	92
2.2.8. Ensaio de densidade aparente .....	94
2.2.9. Correção das estimativas de frequência de ressonância .....	97
<b>2.3. Procedimentos metodológicos para ensaio .....</b>	<b>98</b>
2.3.1. Caracterização da câmara reverberante .....	99
2.3.2. Princípio de funcionamento da câmara reverberante .....	100
2.3.3. Bandas de Frequências .....	101
2.3.4. Câmara reverberante .....	101
2.3.5. Área de absorção sonora .....	103
2.3.6. Amostras para ensaio .....	104
<b>2.4. Medições para o tempo de reverberação .....</b>	<b>106</b>
2.4.1. Posições de fonte e microfone .....	106
2.4.2. Método do ruído interrompido .....	108
2.4.3. Tempo de reverberação e área de absorção sonora equivalente .....	111

2.4.4. Cálculo do coeficiente de absorção sonora .....	111
<b>CAPÍTULO III – RESULTADOS</b>	
<b>3.1. Ensaio realizado e resultados em câmara reverberante .....</b>	<b>114</b>
3.1.1. Ensaio realizado em laboratório .....	115
3.1.2. Configurações dos decaimentos sonoros .....	115
3.1.3. Resultados dos tempos de reverberação .....	116
3.1.4. Resultados das áreas de absorção sonora equivalente .....	117
3.1.5. Resultados dos cálculos de coeficientes de absorção sonora .....	119
<b>3.2. Análise de resultados .....</b>	<b>121</b>
3.2.1. Painéis com cavidade vazia .....	121
3.2.2. Painel com cavidade vazia tipo BE025 .....	123
3.2.3. Painel sem cavidade tipo BE000 .....	125
3.2.4. Painéis com cavidade preenchida com lã de vidro .....	126
3.2.5. Lã de vidro de 50mm ensaio LAV050 .....	128
3.2.6. Considerações parciais .....	129
<b>CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>131</b>
<b>4.1. Conclusão .....</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO I – Ensaio BE100 .....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO II – Ensaio BE075 .....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO III – Ensaio BE050 .....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO IV – Ensaio BE025 .....</b>	<b>141</b>
<b>ANEXO V – Ensaio BE000 .....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXO VI – Ensaio BEL100 .....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO VII – Ensaio BEL075 .....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO VIII – Ensaio BEL050 .....</b>	<b>145</b>
<b>ANEXO IX – Ensaio LAV050 .....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO X – Medição das espessuras do painel em BaLC .....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO XI – Especificações CASCOLA PU Monocomponente .....</b>	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>151</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>157</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 -	Movimento harmônico simples. Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.	09
Figura 02 -	Harmônicos de uma onda sonora. Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.	10
Figura 03 -	Sons de diferentes fontes compostos de harmônicos diferentes. Fonte: Adaptado de SILVA, 2002.	11
Figura 04 -	Reflexão, Transmissão e Absorção Sonora. Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.	15
Figura 05 -	Fonte Sonora Omnidirecional para ensaios em laboratório. Fonte: Catálogo Brüel & Kjaer, 2014.	17
Figura 06 -	Tempo de Reverberação. Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.	19
Figura 07 -	Absorção sonora de diferentes dissipadores Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.	23
Figura 08 -	Variação de Coeficiente de absorção sonora para materiais porosos e fibrosos. Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.	24
Figura 09 -	Mecanismos de dissipação da energia sonora nos materiais. Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.	25
Figura 10 -	Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos e fibrosos. a) Variação da espessura; b) Efeito da camada de ar. Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.	25
Figura 11 -	Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos e fibrosos. a) Variação de densidade; b) Efeito da aplicação de tinta. Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.	26
Figura 12 -	Curva simplificada do coeficiente de absorção da membrana ressonante Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.	27
Figura 13 -	Curvas de previsão para o coeficiente de absorção sonora de Sabine. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	30
Figura 14 -	Curvas de previsão para painéis em compensado de madeira. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	31
Figura 15 -	Ressorador e esquema de funcionamento. Fonte: Adaptado de KUTTRUFF, 2009.	32

Figura 16 -	Curva de absorção do ressonador Helmholtz. Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006	<b>33</b>
Figura 17 -	Mapa de diversidade de espécies na África e Américas. Fonte: Adaptado de UNEP/INBAR 2003.	<b>35</b>
Figura 18 -	Diferentes espécies de bambu. Fonte: Adaptado de YU, 2007.	<b>37</b>
Figura 19 -	Tipos de rizomas. Fonte: Adaptado de KIGOMO, 2007.	<b>38</b>
Figura 20 -	As partes do bambu. Fonte: Adaptado de CAN, 2013.	<b>39</b>
Figura 21 -	Micrografia ótica das microestruturas do bambu. (a) Corte transversal de um colmo. (b) Parede do colmo de bambu que mostra a distribuição radial de feixes vasculares. (c) Parede do colmo em maior ampliação. Feixes vasculares, fibras e parênquima estão alinhados com o eixo longitudinal do colmo. Os feixes tornaram-se quase totalmente esclerificado no tecido na periferia. (d) Feixes vasculares com ampliação. (e) Secção transversal das células individuais de fibra em um feixe de fibras. Fonte: Adaptado de WEGST, 2008.	<b>40</b>
Figura 22 -	Variação do comprimento das fibras pelo comprimento de um entrenó. Fonte: Adaptado de LIESE, 1985	<b>41</b>
Figura 23 -	Comparação entre força e rigidez dos materiais. Fonte: Adaptado de JANSSEN, 2000.	<b>43</b>
Figura 24 -	Wind and Water Café, Ho Chi Minh City. Fonte: Adaptado de HERKINSON; GEENBERG, 2010.	<b>50</b>
Figura 25 -	Aplicações do bambu fatiado. Fonte: Adaptado de YU, 2007.	<b>51</b>
Figura 26 -	Disposições estruturais de painéis de BaLC. Em a, a1, a2, a3) Painéis de ripas coladas na horizontal; b, b1, b2, b3) Painéis com ripas coladas na vertical; c, c1, c2) Painéis com ripas coladas em direções invertidas (contraplacados); d) Painéis com tiras entrelaçadas. Fonte: Adaptado de MOISÉS, 2007.	<b>57</b>
Figura 27-	Cadeia produtiva do <i>plybamboo</i> . Fonte: Adaptado de ZHANG, 2001.	<b>61</b>
Figura 28 -	<i>Plybamboo</i> . Fonte: Catálogo de produtos da BCD Technology Co. Ltd.	<b>62</b>
Figura 29 -	<i>Plybamboo</i> . Fonte: Catálogo de produtos da BCD Technology Co. Ltd.	<b>62</b>

Figura 30 -	Gráfico paramétrico para dimensionamento de membrana ressonante. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN (2009).	<b>68</b>
Figura 31 -	Corte esquemático do dispositivo absorvedor - A. Painel de bambu; B. Anéis removíveis; C. Painel de compensado de madeira; D. Aro de pressão. E. Parafuso com porca e arruela. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>71</b>
Figura 32 -	Perspectiva virtual do projeto de absorvedor acústico de baixa frequência. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>71</b>
Figura 33 -	Perspectiva explodida dos elementos componentes do projeto separados em ordem de encaixe. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>72</b>
Figura 34 -	a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção sonora; b. Gráfico paramétrico de dimensionamento com cavidade, densidade superficial e frequência de ressonância; Fonte: Adaptado BIES e HANSEN, 2009.	<b>75</b>
Figura 35 -	a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE100 e BEL100. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	<b>76</b>
Figura 36 -	a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE075 e BEL075. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	<b>76</b>
Figura 37 -	a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE050 e BEL050. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	<b>77</b>
Figura 38 -	a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE025. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	<b>78</b>
Figura 39 -	Fluxograma das etapas de produção do BaLC do CPAB/UnB. Fonte: Adaptado de SANTOS, 2013.	<b>81</b>
Figura 40 -	Oficina de Marcenaria em Bambu e Madeira do CPAB/UnB. Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Jaime Almeida.	<b>82</b>
Figura 41 -	Estoque de bambu para a produção do BaLC da Oficina do CPAB/UnB. Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.	<b>83</b>
Figura 42 -	Máquina fatiadora de ripas. Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.	<b>84</b>

Figura 43 -	Bambu cortado pela máquina fatiadora. Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.	<b>84</b>
Figura 44 -	Máquina taquari para nivelamento de ripas de bambu. Fonte: Arquivo CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.	<b>84</b>
Figura 45 -	Esquema de lâminas. Fonte: SANTOS, 2013.	<b>85</b>
Figura 46 -	Resíduos da máquina taquari. Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.	<b>85</b>
Figura 47 -	Ripas em secagem no CPAB/UnB. Fonte: Foto do autor.	<b>86</b>
Figura 48 -	Espessura final da lamina de bambu. Fonte: Foto do autor.	<b>87</b>
Figura 49 -	Balança de precisão usada. Fonte: Foto do autor.	<b>87</b>
Figura 50 -	Corpos de prova em secagem na estufa. Fonte: Foto do Autor.	<b>88</b>
Figura 51 -	Temperatura de secagem da estufa. Fonte: Foto do Autor.	<b>88</b>
Figura 52 -	Esquema de colagem e prensagem horizontais. Fonte: Arquivo do CPAB, 2011.	<b>89</b>
Figura 53 -	Prensa horizontal do CPAB/UnB. Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.	<b>90</b>
Figura 54 -	Adesivo utilizado para a colagem das ripas de bambu. Fonte: Foto do autor.	<b>90</b>
Figura 55 -	Painéis de bambu laminado colado sem acabamento. Fonte: Foto do autor.	<b>91</b>
Figura 56 -	Sistema de encaixe tipo macho-fêmea. Fonte: Foto do autor.	<b>92</b>
Figura 57 -	Peças para a montagem do protótipo. Fonte: Foto do autor.	<b>92</b>
Figura 58 -	Montagem dos painéis. Fonte: Foto do autor.	<b>93</b>
Figura 59 -	Protótipo montado sem acabamento final. Fonte: Foto do autor.	<b>93</b>
Figura 60 -	Protótipo do dispositivo de tipo membrana ressonante finalizado. Fonte: Foto do autor.	<b>93</b>

Figura 61 -	Protótipo com a demonstração dos anéis removíveis e a membrana em BaLC. Fonte: Foto do autor.	<b>94</b>
Figura 62 -	Membrana de BaLC do topo e placa de compensado de madeira do fundo. Fonte: Foto do autor.	<b>94</b>
Figura 63 -	Medidor de digital utilizado. Fonte: Foto do autor.	<b>95</b>
Figura 64 -	Parquímetro digital utilizado no ensaio. Fonte: Foto do autor.	<b>95</b>
Figura 65 -	Corpos de prova do painel confeccionado em BaLC. Fonte: Foto do autor.	<b>96</b>
Figura 66 -	Correção dos picos de ressonância e estimativa de coeficiente de absorção acústica. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.	<b>97</b>
Figura 67 -	Planta esquemática da câmara de reverberante da EAC/UFSM. Unidade: cm. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>99</b>
Figura 68 -	Câmara reverberante da EAC/UFSM. Fonte: <a href="http://www.eac.ufsm.br">www.eac.ufsm.br</a> , autor desconhecido.	<b>100</b>
Figura 69 -	Modelo virtual tridimensional do volume da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da EAC/UFSM com a indicação das diagonais principais. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>102</b>
Figura 70 -	Área de absorção sonora equivalente da câmara vazia comparada às áreas calculadas pelo limite estabelecido pela ISO 354:2007. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>104</b>
Figura 71 -	Planta esquemática do posicionamento da amostra em na câmara reverberante da EAC/UFSM. Sem escala. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>105</b>
Figura 72 -	Planta esquemática com os pontos de medição e distâncias entre os mesmos e as paredes. Sem escala. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>107</b>
Figura 73 -	Distribuição base dos painéis durante os ensaios em câmara reverberante. Fonte: Foto do Autor.	<b>114</b>
Figura 74 -	Tempos de reverberação dos ensaios realizados em câmara reverberante (TR). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>116</b>

Figura 75 -	Área de absorção sonora equivalente calculada para cada ensaio por banda de frequência. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>119</b>
Figura 76 -	Coeficiente de absorção sonora calculado para cada ensaio por banda de frequência ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>120</b>
Figura 77 -	Coeficiente de Absorção sonora dos ensaios BE100, BE075 e BE050 ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>122</b>
Figura 78 -	Coeficientes de absorção sonora obtidos em câmara reverberante para BE025 ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>124</b>
Figura 79 -	Disposição do ensaio BE025 em câmara reverberante. Fonte: Foto do autor.	<b>124</b>
Figura 80 -	Coeficiente de absorção sonora de BE000 por espectro de frequências obtido em ensaio ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>125</b>
Figura 81 -	Coeficiente de absorção sonora de BEL100, BEL075 e BEL050 por banda de frequências ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>126</b>
Figura 82 -	Comparação de coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ), laboratório x especificação do fabricante. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>128</b>
Figura 83 -	Coeficiente de absorção sonora calculado em laboratório ( $\alpha_s$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>129</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 -	Resumo dos modelos de absorvedor tipo membrana e a previsão de suas características acústicas de acordo com pré-dimensionamento. Fonte: Elaborado pelo autor	<b>78</b>
Tabela 02 -	Ensaio de teor de umidade das ripas de bambu. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>88</b>
Tabela 03 -	Ensaio de densidade aparente do painel de BaLC produzido pelo CPAB/UnB. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>97</b>
Tabela 04 -	Resumo dos modelos de absorvedor tipo membrana e a previsão de suas características acústicas. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>98</b>
Tabela 05 -	Dados dimensionais da câmara reverberante da EAC/UFMS calculados por software de modelagem tridimensional. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>102</b>
Tabela 06 -	Limite da área de absorção sonora equivalente para a câmara reverberante vazia. Fonte: ISO 354:2007.	<b>103</b>
Tabela 07 -	Posicionamento de fonte e microfone para realização dos ensaios. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>108</b>
Tabela 08 -	Ensaio realizados em câmara reverberante, configurações e previsões. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>115</b>
Tabela 09 -	Tempos de reverberação obtido nos ensaios em câmara reverberante (TR). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>117</b>
Tabela 10 -	Área de absorção equivalente de cada ensaio por espectro de frequência (At). Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>118</b>
Tabela 11 -	Coefficientes de absorção sonora de cada ensaio por banda de frequência. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>120</b>
Tabela 12 -	Coefficiente de absorção sonora de 50 a 400Hz para BE100, BE075 e BE050. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>123</b>
Tabela 13 -	Coefficiente de absorção sonora para BE025 por banda de frequência. Fonte: Elaborado pelo autor.	<b>125</b>

Tabela 14 -	Coeficiente de absorção sonora de BE000 por banda de frequências.	<b>126</b>
	Fonte: Elaborado pelo autor.	
Tabela 15 -	Coeficiente de absorção sonora para BEL100, BEL075 e BEL050.	<b>127</b>
	Fonte: Elaborado pelo autor.	
Tabela 16 -	Comparação do coeficiente de absorção sonora obtido no laboratório e especificação do fabricante.	<b>128</b>
	Fonte: Elaborado pelo autor.	

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 -	Níveis de pressão sonora. Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.	13
Quadro 02 -	Composição química do bambu e das madeiras com densidade semelhante. Fonte: Adaptado de YU, 2007	42
Quadro 03 -	Valores médios obtidos nos ensaios de resistência mecânica. Fonte: Adaptado de PEIXOTO, 2010.	43
Quadro 04 -	Diferentes valores de massa específica aparente encontrados para a espécie de bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Fonte: Adaptado de MARINHO, 2012.	44
Quadro 05 -	Biomassa relativa do bambu. Fonte: Adaptado de JANSSEN, 2000.	47
Quadro 06 -	Energia necessária para produção dos materiais. Adaptado de GHAVAMI, 1990.	48
Quadro 07 -	Tipos de adesivos e seus usos. Fonte: JESUS apud RIVERO, 2003.	60
Quadro 08 -	Coefficientes de absorção acústica da lã de vidro AISLHOGAR. Fonte: Owens Corning, 2011.	80
Quadro 09 -	Bandas de terço de oitava para a medição nos ensaios em câmara reverberante. Fonte: ISO 354:2007.	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A.C.</b>	- Antes de Cristo
<b>ABNT</b>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>BaLC</b>	- Bambu Laminado Colado
<b>BE000</b>	- Ensaio da membrana de bambu sem cavidade interna de ar
<b>BE025</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 25 milímetros de ar na cavidade interna vazia
<b>BE050</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 50 milímetros de ar na cavidade interna vazia
<b>BE075</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 75 milímetros de ar na cavidade interna vazia
<b>BE100</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 100 milímetros de ar na cavidade interna vazia
<b>BEL050</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 50 milímetros de ar na cavidade interna preenchida com 50 milímetros de lã de vidro
<b>BEL075</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 75 milímetros de ar na cavidade interna preenchida com 50 milímetros de lã de vidro
<b>BEL100</b>	- Ensaio da membrana de bambu com 100 milímetros de ar na cavidade interna preenchida com 50 milímetros de lã de vidro
<b>CAN</b>	- <i>Community Architects Network</i>
<b>CEPASA</b>	- Celulose e Papel de Pernambuco
<b>CPAB/UnB</b>	- Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília.
<b>CV</b>	- Coeficiente de Variação
<b>DF</b>	- Distrito Federal
<b>EAC/UFSM</b>	- Faculdade de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria.
<b>LEAC/EAC/UFSM</b>	- Laboratório de Engenharia Acústica da Faculdade de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria.
<b>FAUUnB</b>	- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília
<b>INBAMBU</b>	- Instituto do Bambu
<b>INBAR</b>	- <i>International Network for Bamboo and Rattan</i>

<b>ISO</b>	- <i>International Organization for Standardization</i>
<b>LPF/SFB/MMA</b>	- Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro
<b>MDF</b>	- <i>Medium density fiberboard</i>
<b>NBR</b>	- Norma Brasileira
<b>NMBA</b>	- <i>National Mission on Bamboo Applications</i>
<b>NPS</b>	- Nível de pressão sonora
<b>NRC</b>	- <i>Noise Reduction Coefficient</i>
<b>NSI</b>	- Nível sonoro de intensidade
<b>OSB</b>	- <i>Oriented strand board</i>
<b>PNMCB</b>	- Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu
<b>PPG-FAUUnB</b>	- Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília
<b>TR</b>	- Tempo de reverberação
<b>TU</b>	- Teor de umidade
<b>UnB</b>	- Universidade de Brasília
<b>UNEP</b>	- <i>United Nations Environment Programme</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>%</b>	- Unidade de medida em porcentagem
<b>°C</b>	- Unidade de medida de temperatura em graus Celsius
<b><math>A_0</math></b>	- Área de absorção sonora equivalente com a câmara reverberante vazia
<b><math>A_1</math></b>	- Área de absorção sonora da câmara reverberante após a inserção do material
<b><math>A_T</math></b>	- Área de absorção equivalente
<b>c/s</b>	- Unidade de medida em ciclos por segundo
<b>cm</b>	- Unidade de medida em centímetros
<b>dB</b>	- Unidade de medida em Decibel
<b>dina/m<sup>2</sup></b>	- Unidade de medida em dina por metro quadrado
<b><math>f_0</math></b>	- Frequência de ressonância, em Hertz
<b>g</b>	- Unidade de medida em gramas
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	- Unidade de medida em gramas por centímetro cúbico
<b>g/m<sup>2</sup></b>	- Unidade de medida em gramas por metro quadrado
<b>HP</b>	- Unidade de medida em <i>Horse Power</i>
<b>Hz</b>	- Unidade de medida em Hertz
<b>J/Kg</b>	- Unidade de medida em joules por quilograma
<b>J/m<sup>3</sup></b>	- Unidade de medida em joules por metro cúbico
<b>Kg</b>	- Unidade de medida em quilogramas
<b>kg/m<sup>2</sup></b>	- Unidade de medida em quilogramas por metro quadrado
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	- Unidade de medida em quilogramas por metro cúbico
<b>km</b>	- Unidade de medida em quilômetros
<b>Km/h</b>	- Unidade de medida em quilômetros por hora
<b><math>l_{max}</math></b>	- Máximo comprimento em linha reta nos limites da câmara reverberante em metros
<b><math>l_n</math></b>	- Logaritmo neperiano da expressão $(1 - l_n)$

$L_p(t)$	- Nível de pressão sonora médio, no instante $t$ , calculado para $N$ decaimentos;
$L_{pn}(t)$	- Nível de pressão sonora do decaimento de ordem $n$ , no instante $t$
<b>m</b>	- Unidade de medida em metros
<b>m/s</b>	- Unidade de medida de em metros por segundo
$m_{12}$	- Massa da madeira a 12% de umidade em quilogramas
$m^2$	- Unidade de medida em metros quadrados
$m^3$	- Unidade de medida em metros cúbicos
$m^3$	- Unidade de medida em metros cúbicos
$m_i$	- Massa inicial da madeira em gramas
$m_i$	- Coeficiente de atenuação devido à absorção sonora do ar
<b>MJ/Kg</b>	- Unidade de medida em megajoules por quilograma
<b>MJ/m<sup>3</sup>/MPa</b>	- Unidade de medida em megajoules por metro cúbico por megapascal
<b>mm</b>	- Unidade de medida em milímetros
<b>MPa</b>	- Unidade de medida em megapascal
$m_s$	- Massa inicial da madeira seca, em gramas
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	- Unidade de medida em newton por milímetro quadrado
<b>Pa</b>	- Unidade de medida em Pascal
$\rho_{ap}$	- Densidade aparente
$\sigma$	- Tensão admissível
$S_i$	- Área da superfície do material em metros quadrados
$T_0$	- Tempo de reverberação com câmara reverberante vazia
$T_1$	- Tempo de reverberação da câmara reverberante após a inserção do material
<b>T20</b>	- Tempo de reverberação para o decaimento de 20 decibéis
<b>T30</b>	- Tempo de reverberação para o decaimento de 30 decibéis
<b>tons/ha</b>	- Unidade de medida em toneladas por hectare

<b><math>V_{12}</math></b>	- Volume da madeira a 12% de umidade em metros cúbicos
<b>Watt</b>	- Unidade de medida em Watt
<b><math>\alpha</math></b>	- Coeficiente de absorção sonora
<b><math>\alpha_i</math></b>	- Coeficiente de absorção acústica do material
<b><math>\alpha_m</math></b>	- Coeficiente médio de absorção das diversas superfícies internas
<b><math>\alpha_m</math></b>	- Coeficiente de absorção médio
<b><math>\alpha_s</math></b>	- Coeficiente de absorção sonora do material

## INTRODUÇÃO

A percepção do mundo pelo ser humano comum passa por cinco sentidos, os quais são a visão, a audição, o tato, o olfato e o paladar. Dentre esses o único que está sempre em alerta é a audição. Do nascimento até a morte, acordado ou dormindo, os ouvidos estão sempre em alerta para o ambiente ao seu redor, seja para sons agradáveis, que trazem uma sensação prazerosa, seja para os sons desagradáveis que deixam em alerta para agir contra o perigo e outras mais sensações (EVEREST; POHLMANN, 2009). Dessa forma, deve-se ter grande atenção com relação ao som no ambiente construído, pois ele sempre afetará o homem de forma benéfica ou prejudicial.

Assim, o estudo da acústica de salas em arquitetura relacionado aos materiais utilizados para o seu condicionamento se mostra como fundamental para o bem estar dos indivíduos, seja para o tratamento de grandes espaços internos, como salas de concertos musicais e teatros, dentre outros, seja para ambientes de menores dimensões, como salas de ensaio, salas de aula, ou mesmo ambientes de trabalho. Dessa forma, o conhecimento das propriedades de absorção sonora desses materiais torna-se cada vez mais importante para o projeto arquitetônico, pois a sua correta aplicação influenciará diretamente a qualidade de vida das pessoas (DE MARCO, 1982).

Esses materiais apresentam diferentes comportamentos acústicos e podem ser classificados como porosos ou fibrosos, para a absorção de altas frequências, ressoadores, para a absorção das médias frequências ou painéis ressonantes, para absorção de baixas frequências (SILVA, 2002). De modo que deve-se buscar o equilíbrio na aplicação desses componentes para obter-se um controle de som adequado a determinado uso. Contudo, os materiais para o condicionamento acústico amplamente disponíveis no mercado e a verificação de seu potencial para tratamento sonoro ainda estão, em sua maioria, voltados para as matérias primas convencionais, como a madeira, e derivados de recursos não renováveis, como os polímeros, as espumas e as fibras minerais.

Logo, o estudo de materiais não convencionais para a aplicação em acústica se mostra pertinente, de modo que existem diversas pesquisas buscando

as potencialidades acústicas das fibras naturais e seus derivados, como o sisal, bagaço de cana e cascas de coco, dentre outros, assim como a reutilização de componentes descartados pela sociedade, como pneus e garrafas *pet*. Nessa perspectiva, a aplicação de materiais de origem vegetal amplia o emprego desses recursos e favorece meio ambiente, pois o a exploração descontrolada e contínua dos recursos naturais do planeta gera impactos negativos para o ser humano e meio no qual está inserido (DIAS, 2004).

Tendo em vista essa busca de materiais renováveis, o bambu apresenta-se como uma matéria prima de origem vegetal que gera uma infinidade de aplicações em diversas áreas, com possibilidade de interface com a madeira e outros materiais industrializados. Classifica-se como uma planta tropical, perene e renovável, a qual anualmente produz colmos e não necessita de replantio. Além de apresentar-se como um excelente sequestrador carbono, pois seu crescimento é rápido e possui potencial para recuperação de áreas verdes, configurando um material excepcionalmente vantajoso (PEREIRA; BERALDO, 2007).

Este estudo tem como objeto de trabalho o bambu industrializado sob a forma de laminado colado (BaLC) produzido a partir do ripamento do colmo. Com essa forma de processamento, o BaLC se assemelha à madeira serrada e pode ser utilizado em chapas para a confecção de produtos para condicionamento acústico. Todavia, no Brasil a exploração desse insumo ainda é artesanal e necessita de estudos contínuos para seu conhecimento e, sobretudo, determinação de suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, de modo que possa ser aplicado aos seus possíveis usos com o devido conhecimento (GHAVAMI, 2006).

De acordo com o observado no Seminário Nacional do Bambu (2006 e 2010) e na Rede Brasileira do Bambu, as pesquisas para o uso desse material na construção civil estão avançando bastante, o que demonstra o interesse por esse insumo. Entretanto, na área de conforto acústico, o bambu ainda não foi amplamente empregado e as pesquisas que analisam seu uso para a acústica são escassas. Assim, as vantagens que esse material pode apresentar e sua possibilidade de complementar o uso da madeira tornam esta pesquisa pertinente e a caracteriza como um estudo inicial para a aplicação do bambu na acústica,

estimulando a investigação dessa matéria prima, e seus derivados, em mais uma área do conhecimento.

Ainda, com a possibilidade da aplicação do BaLC na forma de chapas semelhantes ao compensado de madeira, seu uso na acústica aproxima-se das membranas ressonantes que são dispositivos especializados para a absorção de baixas frequências. Esses sistemas de absorção sonora funcionam por meio da atenuação do som pela vibração mecânica, assim podem ser projetados para absorver determinadas frequências, pois sua absorção máxima ocorre em sua frequência de ressonância (BISTAFA, 2006).

Portanto, tendo em vista as questões apresentadas, esta pesquisa busca a introdução de um material não convencional, o bambu como material de construção, para aplicação no condicionamento sonoro em arquitetura predial. Assim, serão estudados os conceitos e possibilidades de aplicação deste material para a absorção sonora e, em seguida, serão avaliadas as potencialidades de produção oferece, de modo a inserir o uso do bambu para no tratamento acústico.

## **OBJETIVO GERAL**

Analisar o emprego do bambu laminado colado em elementos de condicionamento acústico de salas, com o desenvolvimento de protótipo experimental de painel tipo membrana ressonante, bem como a realização de ensaios de coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Revisar os principais conceitos acústicos relativos ao condicionamento de salas e as formas em que são utilizados os materiais para tratamento interno dos recintos;
- b) Estudar as propriedades do bambu como matéria prima, analisando suas vantagens e as formas de sua produção industrial;
- c) Desenvolver e avaliar um sistema de absorção sonora com o uso do bambu laminado colado;

- d) Confeccionar protótipos do sistema de absorção sonora utilizando a espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus* em painéis tipo membrana ressonante de bambu laminado colado;
- e) Realizar ensaios absorção sonora para a caracterização, em câmara reverberante, do coeficiente de absorção sonora dos protótipos confeccionados;
- f) Comparar as estimativas de frequência de ressonância e do coeficiente de absorção sonora calculadas pelas fórmulas de previsão com os resultados obtidos nos ensaios em câmara reverberante; e
- g) Avaliar o desempenho do sistema absorvedor proposto, assim como as limitações e potencialidades encontradas na confecção dos protótipos e realização dos ensaios em laboratório.

A organização da dissertação foi, então, dividida em quatro capítulos organizados de modo a proporcionar maior clareza e compreensão das etapas envolvidas. Iniciando pela compreensão da acústica envolvida no condicionamento interno de recintos fechados, seguido pela exposição das características do material proposto para o uso. Por conseguinte, é apresentada a proposta de absorvedor acústico com seu projeto e execução, e por fim, são descritos os ensaios realizados em laboratório, os resultados e as análises proporcionadas pelos dados. A dissertação finaliza-se com as considerações finais e proposição de novas pesquisas.

A revisão de literatura, Capítulo I, é subdividida em quatro seções que abordam os principais conceitos relacionados à propagação sonora; as referências para tratamento interno de recintos fechados, com a exposição dos fenômenos acústicos e formas de previsão que norteiam o condicionamento de salas; os aspectos essenciais para o conhecimento do bambu como possibilidade de matéria prima; e o sistema de ripas aplicado ao bambu, exemplificando as formas de produção existentes para os painéis confeccionados com esse material.

Dessa forma, a revisão de literatura aborda a acústica e a caracterização do bambu, de modo a destacar os principais conceitos relativos ao uso deste material como absorvedor acústico, bem como a forma no qual a matéria prima será

processada para a confecção do protótipo. Em seguida são apresentados os materiais e métodos, que expõe a escolha da espécie de bambu, o projeto de sistema de absorção sonora, a execução do protótipo e os procedimentos metodológicos para ensaio.

O capítulo II subdivide-se, então, em seis seções que incluem a escolha da espécie e do sistema absorvedor, o desenvolvimento e caracterização da proposta; as etapas para a execução dos protótipos com os ensaios de umidade do material e também densidade aparente realizados em laboratório e as condicionantes da norma ISO 354:2007 para ensaio dos protótipos em câmara reverberante.

O capítulo III apresenta os resultados obtidos em laboratório com a exposição dos resultados e a análise dos mesmos. Dessa forma, são verificados em conjunto e separadamente para examinar as propriedades encontradas e ponderar considerações parciais sobre a etapa.

No capítulo IV, *Considerações finais*, são feitas as conclusões sobre os resultados obtidos com a elaboração da dissertação, de forma a criar algumas diretrizes para trabalhos futuros e demonstrar as potencialidades e limitações encontradas durante a pesquisa. Finalizando, em *Referências bibliográficas* e em *Bibliografia*, onde são reunidos todos os autores que foram utilizados para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

## **CAPÍTULO I – REVISÃO DE LITERATURA**

# 1. REVISÃO DE LITERATURA

## 1.1. Propriedades do som

### 1.1.1. Conceito do som

Existem dois conceitos importantes relacionados ao som, pois quando se trata de seu estudo fundamental pode-se abordar seu aspecto físico, os quais são as perturbações físicas que ocorrem em um meio de propagação. Logo, esse primeiro conceito caracteriza o som como todo e qualquer distúrbio propagado por um meio elástico que causa alteração de pressão e oscilação de partículas, podendo ser detectados pela audição ou por meio de instrumentos de medição (BERANEK, 1996). Ou pode-se o abordar o segundo conceito como sensação sonora, ou seja, aquela qual afeta os sentidos, sendo captada pelo ouvido como som audível.

De acordo com Silva (2002), o conceito que mais interessa na acústica arquitetônica é a sensação sonora captada pelo aparelho auditivo. E destaca, também, a importância do meio em que se propaga, pois essa sensação somente ocorre se o indivíduo está imerso em meio provido de inércia e elasticidade. Assim, ressalta como fundamental o ar que o envolve, pois constitui o meio normal de propagação do som para alcançar percepção humana. Todavia, se não houver meio gasoso circundando o sujeito que recebe o estímulo sonoro, sua sensação psicofisiológica deixará de ser transmitida.

Ainda, um simples experimento de confinar um alarme dentro de uma câmara na qual se extrai o ar por uma bomba pneumática. Enquanto houver ar em seu interior poder-se-á observar visual e audivelmente o alarme tocar, por meio da visualização da vibração e ouvir o som do equipamento. Contudo, ao passo que se retira o ar da câmara, o som desaparece gradativamente e somente será visualizada a vibração do aparelho no interior da mesma. Dessa forma, esse experimento demonstra a separação entre a percepção física do som e sua sensação psicofisiológica, pois enquanto se pode visualizar seu aspecto físico, com a vibração observada pela visão, sua característica auditiva cessa perante a ausência de meio elástico, ou seja, o ar (SILVA, 2002).

Este estudo se restringirá na abordagem do som como sensação sonora e suas variantes. Entretanto, alguns conceitos físicos são necessários para a compreensão das interações entre o meio em que o indivíduo está inserido e a

percepção que tem do fenômeno sonoro. A seguir, são observadas algumas das principais características físicas do som aplicadas na acústica arquitetônica.

### 1.1.2. Propagação do som

Do ponto de vista físico, o som é definido como uma perturbação que se propaga em meios materiais, capaz de ser percebida pelo aparelho auditivo humano. Essa perturbação no meio pode ser gerada por um corpo que vibra, transmitindo suas vibrações ao meio que está inserido. Logo, as moléculas desse meio sofrem, de modo alternado, compressões e rarefações, seguindo o movimento do corpo que iniciou esse deslocamento (DE MARCO, 1982).

Assim, a forma como o som se propaga em diversos meios depende do movimento oscilatório das moléculas. Logo, partindo de seu estado de equilíbrio, quando não há a transmissão do som, as moléculas iniciam um estado alternado de movimento, quando há transmissão sonora, e posteriormente são forçadas a voltar para a sua posição inicial, devido às forças elásticas do meio em que acontece a vibração. Dessa forma, as partículas não extrapolam sua zona de equilíbrio. Elas somente oscilam de um lado para o outro em torno de seu ponto central, no qual permanecem, na ausência de movimento ou diferença de pressão (SILVA, 2002).

Existem diversos meios no qual o som pode se propagar, desde os líquidos, como a propagação na água ou outros mais, como os meios sólidos e gasosos. Em cada um a velocidade de propagação é diferente, ou seja, uma batida em uma superfície densa e metálica propagará o som mais rapidamente que o mesmo impacto provocará no ar. Contudo, neste estudo interessa a propagação do som no ar, pois é nesse meio que ocorre a atenuação sonora foco desta pesquisa.

### 1.1.3. Frequência

O movimento oscilatório descrito anteriormente é composto de alguns elementos distintos. Pois cada molécula executa esse movimento oscilatório de forma repetitiva, gerando ciclos que tardam um determinado tempo, chamado período. Logo, a frequência com que esses ciclos ocorrem durante o tempo será de ordem inversa ao período (DE MARCO, 1982).

A frequência é medida, então, em ciclos por segundo (c/s) denominados *Hertz* (Hz). Logo, classifica-se as ondas sonoras de acordo com a sua frequência,

assim são denominados como infrassons, as frequências abaixo de 20Hz, as baixas frequências, de 20 a 200Hz, as médias frequências, de 200 a 2.000Hz, as altas frequências, de 2000 a 20.000Hz e os ultrassons, acima de 20.000Hz (CARVALHO, 2006). Outrossim, essas frequências estão diretamente relacionadas à percepção de agudos e graves pelo ouvido humano. De modo que quanto mais baixa a frequência, até o limite dos infrassons, percebe-se o som como grave, e quanto mais alta a frequência, chegando aos ultrassons, é percebida como sons agudos. São classificados da seguinte forma: os infrassons, não perceptíveis ao ouvido humano – os sons graves, as baixas frequências – sons médios, as médias frequências – sons agudos, as altas frequências – não perceptíveis ao ouvido humano, os ultrassons. (CARVALHO, 2006).

#### 1.1.4. Onda acústica

Imaginando uma fonte sonora como pontual, ou seja, um ponto fixo que cria vibrações dentro do espectro de percepção do ouvido humano, e localizada em um meio de propagação homogêneo, as ondas emitidas por esse corpo serão esferas concêntricas e se expandirão na velocidade do som. Caso essas ondas sejam observadas a uma distância suficiente afastada da fonte, pode-se estudá-las como ondas planas (DE MARCO, 1982).

Dessa forma, Everest e Pohlmann (2009) ressaltam que a vibração mais simples que pode ser tipificada é aquela relativa a uma única frequência, que é denominada movimento harmônico simples. Por exemplo, a vibração de um diapasão gera um tom chamado puro. Representando graficamente esse movimento por um diagrama cartesiano, será obtida a Figura 01.

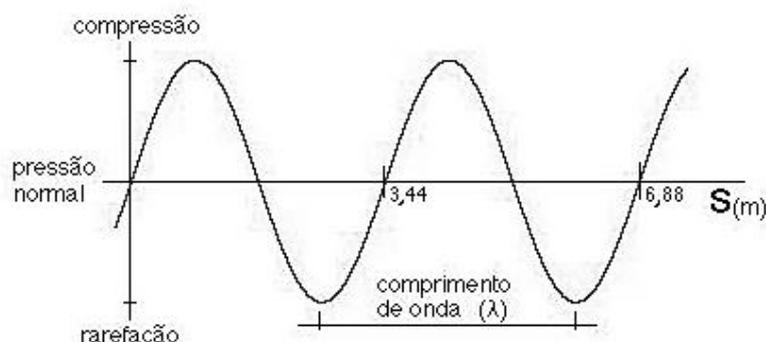


Figura 01: Movimento harmônico simples.  
Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.

Na Figura 01 observa-se o valor das pressões acústicas no eixo das ordenadas e o valor do tempo no eixo das abcissas gerando uma senoide, com a variação entre compressão e rarefação da onda sonora. O movimento harmônico simples é fundamental para a compreensão do movimento ondulatório, pois a onda sonora pode ser considerada como resultante da superposição de vários tons puros, ou simples. Logo, um som qualquer, então, poderá ser composto de inúmeros harmônicos simples e serão denominados 1º harmônico (som fundamental), 2º harmônico, 3º harmônico e assim por diante (SILVA, 2002).

Como exemplificado na Figura 02, no qual A representa a frequência fundamental  $f_1$  ; em B tem-se o segundo harmônico  $f_2=2f_1$  e metade da amplitude da frequência fundamental; em C observa-se a soma  $f_1$  e  $f_2$  ; em D exemplifica-se o terceiro harmônico,  $f_3=3f_1$  com a metade da amplitude de  $f_1$  ; e, por fim, em E observa-se a onda resultante da adição dos três harmônicos  $f_1, f_2, f_3$ . Ainda, todas as ondas estão em fase, ou seja, todos começam do zero no mesmo instante (EVEREST; POHLMANN, 2009).

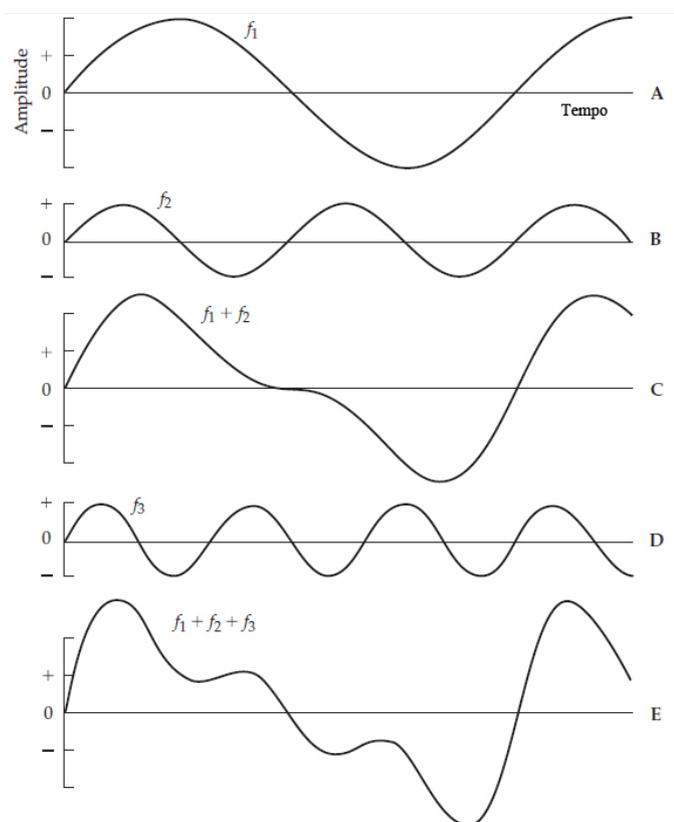


Figura 02: Harmônicos de uma onda sonora.  
Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.

Outro ponto importante a ser ressaltado trata do som originado por diferentes fontes. Uma flauta, a voz humana ou um violino, quando comparados com o som fundamental de um diapásão e considerando que os três tenham a mesma amplitude e a mesma frequência, possuem representações diferentes para o gráfico das curvas. Esse comportamento acontece devido ao fato do número de harmônicos simples para cada uma das fontes ser diferente, e conseqüentemente percebe-se como sons distintos (SILVA, 2002). A Figura 03 apresenta a representação gráfica desses sons.

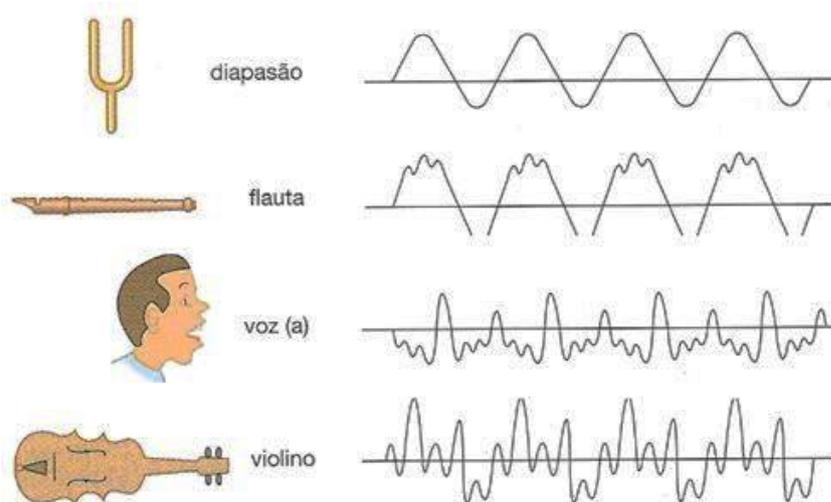


Figura 03: Sons de diferentes fontes compostos de harmônicos diferentes.  
Fonte: Adaptado de SILVA, 2002.

#### 1.1.5. Velocidade do som no ar e outros meios

A velocidade de propagação do som depende principalmente do meio em que a onda sonora está inserida. Quanto mais densa a estrutura molecular, mais fácil será a transferência de energia sonora entre as moléculas e, portanto, maior a velocidade de propagação, estabelecendo uma relação, entre meio e velocidade, a qual é diretamente proporcional à densidade (EVEREST; POLHMANN, 2009).

Outros fatores podem, também, influenciar nessa velocidade como a relação diretamente proporcional entre a temperatura e umidade do meio de propagação. Ou seja, quanto mais úmido o meio em que a onda está sendo propagada, maior será sua velocidade, assim como, quanto mais alta a temperatura do meio, maior será a velocidade do som. No ar, a temperatura de 20°C e ao nível do mar, a velocidade de propagação do som é de 343m/s (CARVALHO, 2006).

Com relação aos líquidos, Silva (2002) observa que Sturm e Colladon determinaram a velocidade do som em 1435m/s, no caso da água, à temperatura de 8°C. E nos sólidos, Biot determinou a velocidade em diversos meios. Para o ferro, 3170m/s; para alvenaria, 3000m/s; na madeira, de 1000 a 4000m/s; no aço, 5000m/s; no granito, 6400m/s; no vidro, 5000m/s; na cortiça, 500m/s; e na borracha, 100m/s.

Contudo, a velocidade mais importante para esse estudo será a do som no ar a 20°C. Pois, trabalhar-se-á com a acústica de pequenas salas, com volume aproximado de 200m<sup>3</sup> de ar, no qual essa velocidade, temperatura e umidade serão fundamentais para seguir as normas estabelecidas no ensaio de dispositivos de absorção sonora.

#### 1.1.6. Intensidade sonora

De acordo com Silva (2002), existe uma diferença bastante acentuada entre as intensidades sonoras que o ouvido humano pode perceber. O ser humano, em geral, pode captar o som de folhas que caem ao chão e também o som de um avião a jato que está decolando. Logo, são pressões sonoras bastante distintas, e tendo isso em vista, surgiu a necessidade de uma escala, com o intuito de determinar as várias pressões acústicas que fazem parte do cotidiano.

A mínima pressão audível, também chamada de mínima de referência, que o ouvido humano pode captar é de 0,0002dina/m<sup>2</sup>, ou 20Pa (SILVA, 2002). E a intensidade máxima que pode-se ouvir chega a um milhão de vezes a mínima de referência. Logo, com uma amplitude tão extensa de percepção, seria bastante difícil trabalhar com essas unidades.

Para tanto, Weber e Fechner *apud* Silva (2002) criaram sua lei psicofísica aplicada ao som, estabelecendo que os incrementos de sensação correspondem a incrementos iguais ao logaritmo da intensidade do estímulo sonoro. Essa nova unidade criada foi denominada nível sonoro de intensidade (NSI) e podem também ser definido como nível sonoro de pressão (NSP), ambos expressam-se em decibel (dB). Assim, a Equação 01 expressa a relação logarítmica que relaciona o nível sonoro de intensidade e a Equação 02 o nível sonoro de pressão. O Quadro 01 (p. 13) apresenta alguns valores de níveis sonoros (DE MARCO, 1982).

$$NSI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

(Equação 01)

Onde:

*NSI* é intensidade do nível sonoro, expresso em decibel;

*I* é a intensidade do som em questão (watt/m<sup>2</sup>);

*I*<sub>0</sub> é a intensidade de referência = 10<sup>-12</sup> watt/m<sup>2</sup>;

$$NSP = 20 \log \frac{P}{P_0}$$

(Equação 02)

Onde:

*NSP* é nível sonoro de pressão, expresso em decibel;

*P* é a pressão do som em questão (μPa)

*P*<sub>0</sub> é a pressão de referência = 20 μPa;

Quadro 01: Níveis de pressão sonora.

Fonte	Pressão Sonora (Pa)	Nível de Pressão Sonora (dB)
Foguete Saturno	100.000	194
Avião a Jato	2.000	160
Avião turbo hélice	200	140
Máquina Rebitadora	20	120
Caminhão Pesado	2	100
Trabalho ruidoso ou tráfego pesado	0,2	80
Conversa	0,02	60
Residência Calma	0,002	40
Folhas caindo	0,0002	20
Limiar Auditivo, excelentes ouvidos em resposta de frequência máxima	0,00002	0

Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.

### 1.1.7. Propagação do som em recintos fechados

Como observado anteriormente, o som se propaga em um meio devido à oscilação das partículas em torno de sua posição de equilíbrio. Ou seja, uma partícula que vibra transmite seu movimento à partícula adjacente e assim consecutivamente gerando a propagação da onda sonora. Ainda, de acordo com Beranek (1996) esse movimento ondulatório pode ser harmonioso gerando um som, que trata de uma percepção sonora agradável, ou pode ser desagradável, ou não harmonioso, gerando um ruído, contudo essa classificação depende, também, de análises subjetivas do indivíduo inserido no recinto.

Apesar da classificação do som em um recinto ter um caráter também subjetivo, seu funcionamento no interior de determinado local é bastante objetivo e assim pode-se controlar alguns aspectos desse som aprisionado para elevar a qualidade acústica do local. Logo, o campo acústico no interior de recintos é uma combinação do som que provém diretamente da fonte, ou seja, do emissor que causa a vibração das partículas, com o som que é refletido pelas superfícies que delimitam esse mesmo recinto (BISTAFA, 2006). Essa propagação de ondas sonoras em espaço fechado gera alguns fenômenos acústicos em seu interior, como a reflexão, transmissão, absorção e difusão, os quais são diretamente influenciados pelas características da onda, como frequência, intensidade sonora, características físicas do meio em que está inserida, dentre outros (BERANEK, 1996).

### 1.1.8. Reflexão, Transmissão e Absorção

Nesta pesquisa serão abordados os três primeiros fenômenos acústicos que acontecem nos recintos fechados, os quais são a reflexão, a transmissão e a absorção sonora, fundamentais para o controle do som em seu interior. De Marco (1982) aponta que equalizando essas três variáveis pode-se chegar a qualidade desejada em cada ambiente, bastando conhecer o comportamento dos materiais e colocá-los para interagir de forma a refletir, transmitir ou absorver as pressões sonoras adequadamente.

Assim, quando as pressões sonoras incidem em determinado obstáculo, seja um anteparo, uma parede ou qualquer outro objeto, acontece um choque em escala molecular de modo que parte de sua energia volte em forma de uma onda de

pressões refletida. O restante dessa energia sonora produz uma onda de vibrações no meio de forma que a parede ou o obstáculo atingido pela onda absorve parte do som incidente (BISTAFA, 2006).

Portanto, parte da energia de vibração das moléculas do obstáculo referido será dissipada sob a forma de calor ou vibração, dentre outros, devido ao atrito que as moléculas recebem em seu movimento ondulatório, e a outra parte voltará ao meio somando-se com a onda refletida e promovendo novas interações. A energia restante produzirá, então, uma vibração do lado oposto e assim o obstáculo, considerando a parede, funcionará como uma nova fonte sonora em um terceiro meio (DE MARCO, 1982). Na Figura 04 pode-se observar esquematicamente como funcionam esses três fenômenos, nos quais: o vetor S é a fonte sonora; em E e K observa a absorção sonora do ar; em A, B e C estão representados as reflexões dos materiais; em F, G, H, I e J observa-se a absorção sonora dos materiais; e em D a transmissão do som para outro meio.

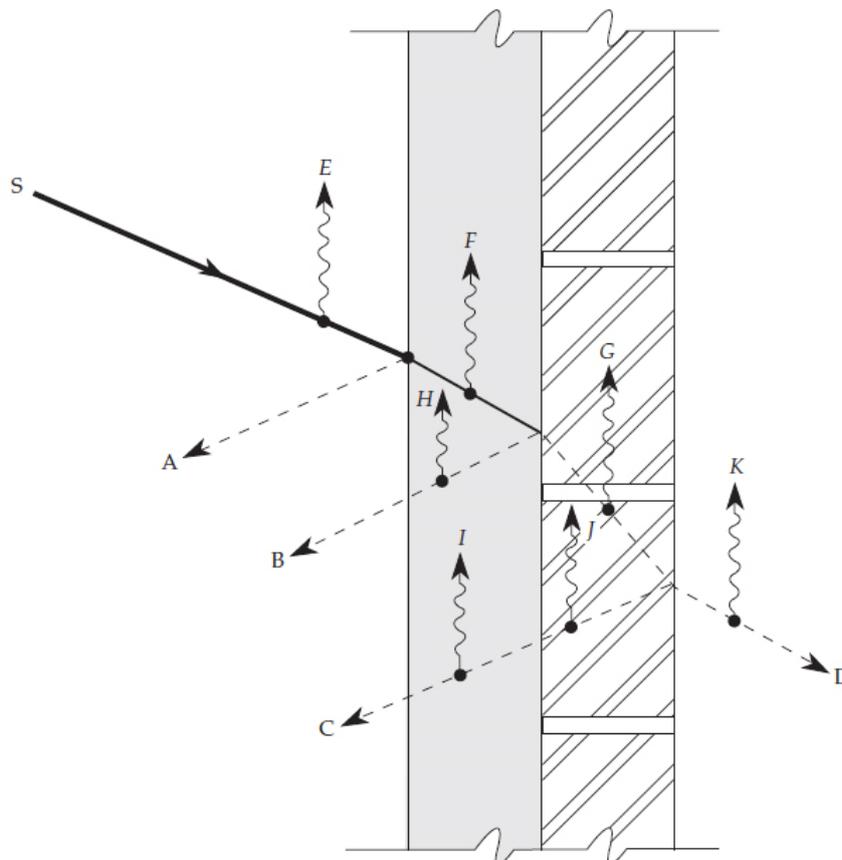


Figura 04: Reflexão, Transmissão e Absorção Sonora.  
Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.

A reflexão seria, então, o fenômeno de incidência de uma onda sonora em uma superfície que separa dois meios distintos, como observado na figura 04 quando a energia que a fonte sonora emite volta para o mesmo meio no qual foi originada. Por conseguinte, a absorção seria quando essa mesma onda sonora se retém no interior da superfície, ou seja, é atenuada pelo obstáculo. E a transmissão seria quando a onda atravessa a superfície e encontra um terceiro meio para se propagar (EVEREST; POHLMANN, 2009).

## **1.2. Acústica de Salas**

Em quase todos os momentos em que o ser humano interage com outros, ele está envolvido por algum recinto fechado, seja nos momentos de descanso em casa, no trabalho o qual passa grande parte da vida, ou mesmo em interações sociais em seu tempo de lazer. Assim, as qualidades acústicas desses ambientes em que está imerso interferem direta e significativamente na sensibilidade dos usuários de diversos espaços fechados. Logo, a acústica de salas tem importância determinante para o bem estar dos indivíduos, pois um espaço com deficiências acústicas relacionado ao seu uso pode gerar diversos problemas de convivência e rendimento para os seres humanos. Como destaca Bistafa (2006), os problemas causados pelo ruído em recintos fechados podem incluir perda de audição, redução da inteligibilidade da fala, dificuldade de concentração, perturbação do sono, dificuldade de comunicação, e diversos outros. A seguir serão apresentados os conceitos fundamentais para a acústica de salas os quais nortearão o desenvolvimento da pesquisa.

### **1.2.1. Tipos de fontes sonoras**

Segundo Bistafa (2006), os sons e ruídos podem ser gerados por diversos mecanismos, contudo ressalta que existem dois tipos de fontes sonoras as quais são as direcionais e as omnidirecionais. De acordo com esse autor, quando o comprimento de onda extrapola a dimensão da fonte, as ondas geradas são esféricas. Já quando o comprimento de onda se assemelha à dimensão da fonte ou menor, a radiação sonora tende a ser direcional. Logo, em frequências com o

comprimento de onda menor, ou seja, as altas frequências, a fonte será altamente direcional.

O tipo de fonte mais comum é a direcional, pois está presente em nosso cotidiano e envolve os sons como a fala, os instrumentos musicais, os alto falantes, eventos sonoros naturais, ruídos como os proporcionados por ar-condicionado, ventiladores, tráfego e diversos outros. A maioria desses sons tem intensidade na faixa de 20 a 120dB, sendo 0dB o limiar da audição e 130dB o limiar da dor. Ainda, o ser humano jovem e em perfeitas condições de audição pode perceber os sons de 20 a 20.000 Hz sendo mais sensível aos sons agudos, altas frequências, acima de 2.000Hz e menos sensível aos de baixa frequência, abaixo de 125Hz, de modo que os sons agudos causam mais a sensação de incomodo. Outro ponto importante, trata da faixa de frequência da voz humana que estende-se de 100Hz a 5.000Hz e a música abrange um pouco mais esse espectro envolvendo sons de 63 a 8.000Hz (BISTAFA, 2006).

Com relação à fonte omnidirecional, Bistafa (2006) pontua que essa seria uma esfera pulsante na qual o som seria igualmente distribuído em todas as direções. Um caso em que se assemelharia esse comportamento seria a exaustão de um motor de combustão interna. Entretanto, para ensaios de absorção sonora em câmara reverberante, de acordo com a norma internacional ISO 354:2007, a fonte sonora deve ser omnidirecional. Essa propagação é criada associando-se diversas fontes direcionais, alto falantes, montadas sobre uma estrutura na forma de um dodecaedro ou de geometria semelhante para, assim, se comportarem como uma fonte omnidirecional. Na Figura 05 pode ser visualizada essa fonte que posteriormente será comentada nos ensaios em laboratório.



Figura 05: Fonte Sonora Omnidirecional para ensaios em laboratório.  
Fonte: Catálogo Brüel & Kjaer, 2014.

### 1.2.2. Parâmetros de qualidade acústica

Os parâmetros objetivos para se determinar a qualidade acústica de uma sala foram bastante desenvolvidos desde a criação do tempo de reverberação, por Sabine, com diversos pontos que podem ser analisados como: o tempo de decaimento inicial, que é a medida do decaimento inicial da reverberação nos primeiros 10dB (KUTTRUFF, 2009); o atraso temporal inicial que trata do intervalo de tempo entre a incidência do som direto e sua primeira reflexão ao ouvinte; a fração inicial de energia lateral que representa a impressão de espacialidade, baseada na razão entre reflexões laterais e reflexões gerais (EVEREST, 2009); além de diversas outras características.

Entretanto, o parâmetro que mais interessa a esta pesquisa é o tempo de reverberação, pois é o princípio fundamental para a qualidade de uma sala e com ele pode-se relacionar as características de reflexão, absorção e transmissão com os materiais que envolvem o condicionamento acústico, assim como calcular os coeficientes de absorção sonora dos materiais por meio de ensaios em câmara reverberante.

#### 1.2.2.1. Tempo de reverberação

O som quando está confinado em um recinto dá origem aos sons refletidos e desse modo gera uma reverberação no ambiente. Inicialmente, ouve-se o som direto e depois suas reflexões nas superfícies existentes. Logo, De Marco (1982) ressalta que existem três modos no qual esse som incidente se distribui em um recinto: o primeiro modo ocorre devido à absorção sonora dos distintos materiais acontecer em diferentes bandas de frequência, assim, o som reverberante não coincide com o som direto; o segundo considera que os materiais de absorção sonora serão distribuídos de forma heterogênea no recinto, assim, estando concentrados nas paredes, por exemplo, a distribuição do som não é homogênea; e, por fim, o terceiro modo trata do som que reverbera e mantém sua energia por um certo tempo no recinto, mesmo depois da fonte sonora cessar sua emissão.

O terceiro aspecto citado anteriormente é o mais importante para a acústica arquitetônica e é chamado de tempo de reverberação. Assim, essa

característica trata do tempo necessário para que a densidade média da energia sonora em determinado recinto decresça em 60dB, a partir do momento em que a fonte sonora interromper sua emissão. Dessa forma, quanto mais rígidas e polidas forem as superfícies na qual o som reflete, maior será o tempo de reverberação do local. Por conseguinte, quanto mais absorventes foram as paredes em que o som incide, menor será o tempo de reverberação (SILVA, 2002). Na Figura 06 observa-se a representação gráfica do tempo de reverberação de um recinto. Em A pode-se observar o decaimento de 60dB e em B a estimativa de decaimento de 60dB por meio da extrapolação da curva de decaimento.

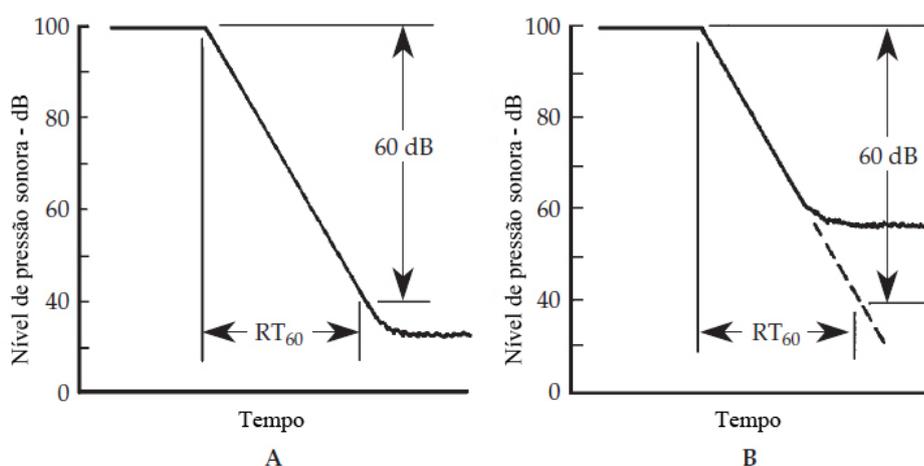


Figura 06: Tempo de Reverberação.  
Fonte: Adaptado de EVEREST; POHLMANN, 2009.

Ainda de acordo com Silva (2002), esse tempo de reverberação é o parâmetro fundamental para a adequação acústica de recintos fechados e, assim, foi desenvolvida de forma empírica, pelo professor norte-americano Wallace Sabine, uma equação para determinar esse tempo no interior dos ambientes em função de dois aspectos, a absorção dos materiais e o volume da sala. Essa equação, porém, continha algumas limitações com relação a superfícies altamente absorventes, e logo, Eyring posteriormente aprimora a equação de Sabine para lidar com essas dificuldades. Contudo, o parâmetro proposto por Sabine ainda é o principal para as correções acústicas e determinação dos coeficientes de absorção dos materiais, de acordo com as normas nacionais e internacionais.

Contudo, é preciso atentar sobre os dados de coeficientes de absorção acústicas presentes no mercado, pois são calculados para serem aplicados à

fórmula de Sabine. Logo, os coeficientes para absorção a serem empregados na equação de Eyring devem estar especificados para esse uso. Existem ainda outras alternativas para o tempo de reverberação e um recinto como as equações de Hopkins-Striker, Millington e Fitzroy, porém são pouco utilizadas (EVEREST, 2009).

#### 1.2.2.2. Fórmula de Sabine

Publicada em 1900, a equação de tempo de reverberação de Sabine foi baseada estritamente em ensaios. Ele tinha duas salas de aula a sua disposição e assim adicionou e removeu uniformemente o assento de almofada das cadeiras de modo que foi capaz de perceber o papel da absorção do material na reverberação da sala. Assim, constatou que o tempo de reverberação depende da reação entre o volume da sala e a absorção acústica propiciada pelos materiais presentes no recinto (EVEREST, 2009). Logo, quanto maior a absorção sonora, menor o tempo de reverberação e quanto maior o volume, maior será o tempo de reverberação, pois o som incidirá com menos frequência das paredes do recinto. De acordo com Kuttruff (2009), a Equação 03 apresenta o desenvolvimento de Sabine.

$$T = 0,161 \frac{V}{A}$$

(Equação 03)

Onde:

$T$  é o tempo de reverberação;

$V$  é o volume da sala em m<sup>3</sup>;

$A$  é a absorção total da sala em Sabines;

$0,161$  é uma constante de precisão.

Observa-se a relação entre o volume da sala e absorção total dos materiais que compõem as superfícies de um determinado recinto. Desse modo, segundo Everest (2009), o uso da equação de Sabine é bastante simples, contudo, deve-se atentar para as superfícies que delimitam o espaço, pois os materiais não são uniformemente distribuídos e em muitos casos deve-se adicionar, também, os coeficientes de absorção sonora dos indivíduos que farão parte do uso do local. Portanto a absorção total será composta do somatório da área da superfície de cada

material multiplicado pelo coeficiente de absorção sonora do mesmo, de acordo com a Equação 04.

$$T = 0,161 \frac{V}{\Sigma(S_i \cdot \alpha_i)}$$

(Equação 04)

Onde:

$T$  é o tempo de reverberação;

$V$  é o volume da sala em  $m^3$ ;

$A$  é a absorção total da sala em Sabines;

$0,161$  é uma constante de precisão;

$S_i$  é a área da superfície do material em  $m^2$ ;

$\alpha_i$  é o coeficiente de absorção acústica do material.

Vale observar que no somatório dos coeficientes de absorção sonora também necessita constar a absorção do ar pelo volume do recinto e todos os fatores que podem contribuir com seu coeficiente de absorção sonora pela área que ocupa. Ainda, o coeficiente de absorção acústica na maioria dos materiais varia de acordo com a frequência. Dessa forma é necessário o cálculo do tempo de reverberação para a banda de frequência desejada. As mais utilizadas são as de 125Hz, 500Hz e 2000Hz (EVEREST, 2009).

É importante ressaltar uma das limitações da equação de Sabine, para ambientes bastante reflexivos sua equação permanece bastante precisa, sendo ela usada nos ensaios em câmaras reverberantes para determinação de coeficientes de absorção sonora de diversos materiais. Entretanto, quando aplicada em ambientes de absorção bastante elevadas, sua fórmula produz alguns resultados imprecisos.

Caso seja aplicada a um ambiente em que a absorção sonora seja total, a equação de Sabine prevê que o ambiente tenha ainda algum tempo de reverberação. Isso se deve a forma em que foi idealizada, pois presume que a propagação do som no ambiente é difusa, assim como nas salas altamente reflexivas. Dessa forma, a equação de Sabine é mais precisa para recintos em que a média dos coeficientes de absorção sonora seja inferior a 0,25 segundo Everest e Pohlmann (2009) ou inferior a 0,5 de acordo com Silva (2002).

### 1.2.3. Parâmetros subjetivos de qualidade acústica

Existem ainda alguns outros parâmetros, denominados subjetivos, para a adequação acústica de um ambiente fechado. De acordo com Nepomuceno (1968), embora os parâmetros objetivos sejam bastante precisos e desenvolvidos para medir o tempo de reverberação e outras qualidades desejadas, ainda cabe ao ouvido humano a decisão final. Pois, a percepção acústica dos indivíduos que compõem esse espaço julgará a qualidade sonora do ambiente. Todavia esta pesquisa reter-se-á apenas em citar a existência de tais parâmetros, pois ainda não se aplicará o material foco dessa pesquisa em recintos para avaliar seu desempenho fora de laboratório.

### 1.2.4. Coeficiente de absorção sonora

Para se tratar acusticamente um recinto fechado com bastante eficácia é necessário alterar suas características de absorção sonora. Logo, essa característica dos materiais é a propriedade que lhes permite atenuar parte da energia que incide sobre os mesmos, de modo a transformar essa energia incidente. Assim, essa absorção depende de alguns fatores como o tipo da superfície, a frequência da onda, o ângulo na qual incide e das formas de aplicação do sistema em que o material é constituinte (DOMINGUES *apud* OLIVEIRA, 2009).

Segundo EVEREST (2009), o coeficiente de absorção é usado para classificar os materiais de acordo com a atenuação sonora que os mesmos proporcionam e pode variar conforme o ângulo de incidência da onda sonora. Todavia, para seu cálculo é considerado um ambiente no qual o som é difuso, ou seja, atinge o material por todos os possíveis ângulos propiciando a absorção sonora e, portanto, esse coeficiente é uma medida de eficiência no qual a superfície ou o material absorvem o som que incide. Logo, se 50% da energia é absorvida em determinada frequência, seu coeficiente de absorção sonora será de 0,5 ( $\alpha$ ) para a mesma frequência.

Caso seja um absorvedor perfeito, no qual muitos autores fazem uma analogia com uma janela aberta na qual todas as ondas são absorvidas, sua eficiência seria de 100% e, logo seu coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) seria de 1,0. Por outro lado, se a superfície fosse completamente reflexiva, seu coeficiente ( $\alpha$ )

seria 0,0. As frequências mais comuns uso em cálculo de tempo reverberação de um recinto são de 125; 250; 500; 1.000; 2.000 e 4.000Hz. Os materiais podem ser classificados, então, como absorvedores caso seu coeficiente de absorção seja superior a 0,5 e são considerados refletores aqueles que possuírem um coeficiente abaixo de 0,2 (KUTTRUF, 2009).

#### 1.2.5. Sistemas de absorção sonora

Existem diversos sistemas que podem funcionar como absorvedores sonoros. Considerando que cada material possui absorção sonora em determinado nível, ou seja, podem atenuar a energia incidente com alguma eficácia, os sistemas sonoros de absorção serão diferenciados de acordo com seu funcionamento e características físicas (BISTAFA, 2006).

Assim, Gerges (2000) classifica como absorvedores de altas frequências os materiais porosos ou fibrosos, por exemplo as lãs minerais, fibras e outros mais, os quais são mecanismos resistivos; os absorvedores de médias frequências são classificados como ressonadores e são fundamentados em um princípio reativo no qual a energia do ruído interage com a ressonância do dispositivo; e as membranas ressonantes atuam como absorvedores de baixas frequências funcionando de forma reativa e buscam atenuar a onda sonora incidente por meio da vibração mecânica e amortecimento interno do sistema. A Figura 07 representa as curvas de absorção sonora para os sistemas citados.

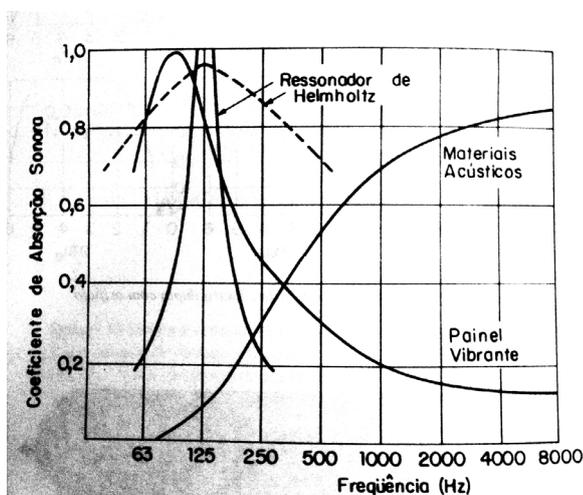


Figura 07: Absorção sonora de diferentes dissipadores.  
Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.

Esses sistemas absorvedores devem atuar em conjunto para o condicionamento satisfatório do ambiente para determinado uso, pois são dispositivos complementares para o tratamento sonoro no interior de recintos. Tendo em vista essa classificação, a seguir serão observados com mais detalhes os efeitos que cada um dos sistemas proporcionam sobre as frequências.

#### 1.2.6. Materiais fibrosos e porosos

Os materiais fibrosos e porosos geralmente possuem uma alta absorção acústica em altas frequências e funcionam fundamentalmente com a dissipação de energia sonora pelo atrito, pois as moléculas de ar movimentam-se no interior do material mediante a passagem da onda sonora (BISTAFA, 2006). Dessa forma, nos materiais porosos as ondas sonoras incidentes atravessam os poros do material e são atenuadas por meio de múltiplas reflexões e atrito, transformando-se em energia térmica. Já nos materiais fibrosos essas ondas entram pelos vazios entre as fibras fazendo-as vibrar junto com o ar e dissipando a energia incidente por meio do atrito entre essas fibras, resultando na conversão desse movimento em energia térmica (GERGES, 2000). A Figura 08 exemplifica a variação típica do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência para esses materiais absorventes.

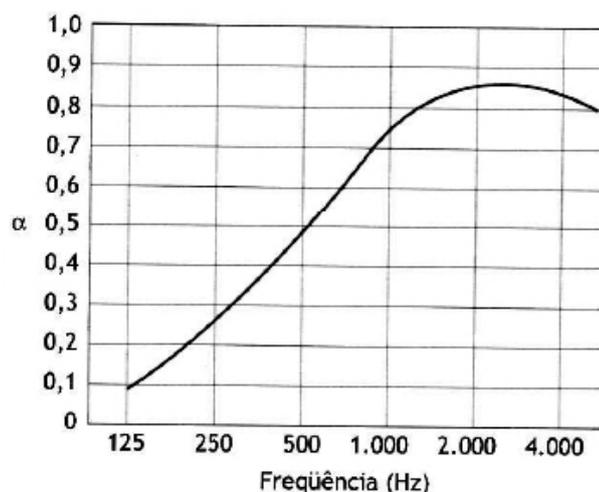


Figura 08: Variação de Coeficiente de absorção sonora para materiais porosos e fibrosos.  
Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.

De acordo com Bistafa (2006), um absorvente de som com qualidade satisfatória seria o material que “respira”, ou seja, aquele que permite às moléculas

de ar penetrar e movimentar-se em seu interior. Dessa forma, a propriedade essencial desses materiais é a resistência ao fluxo de ar, pois o aumento da absorção sonora pressupõe uma resistência ótima no movimento do ar através do material. A Figura 09 representa a diferença entre os dois materiais citados e mostra como o ar movimenta-se no interior de cada uma.

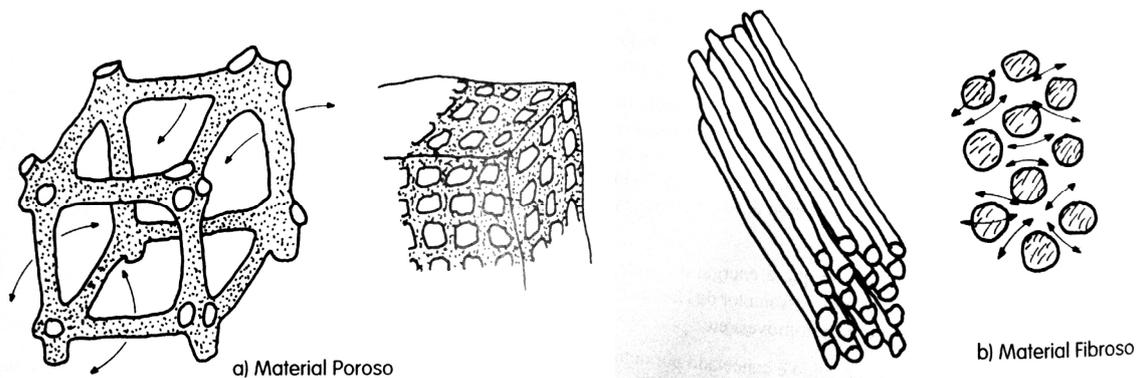


Figura 09: Mecanismos de dissipação da energia sonora nos materiais.  
 Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.

De acordo com Bistafa (2006), diversos fatores influenciam a capacidade desses materiais de absorver as ondas sonoras, como as variações de densidade, camada de ar, espessura e aplicação de tinta. A variação da espessura influencia diretamente o coeficiente de absorção sonora do material (Figura 10a), pois o aumento dessa característica implica também um aumento significativo em suas propriedades absorvedoras, de modo que o material passa a absorver uma gama de frequências mais ampla. Já o efeito da camada de ar por trás do material faz com que absorva, de forma bastante eficaz, as baixas frequências (Figura 10b).

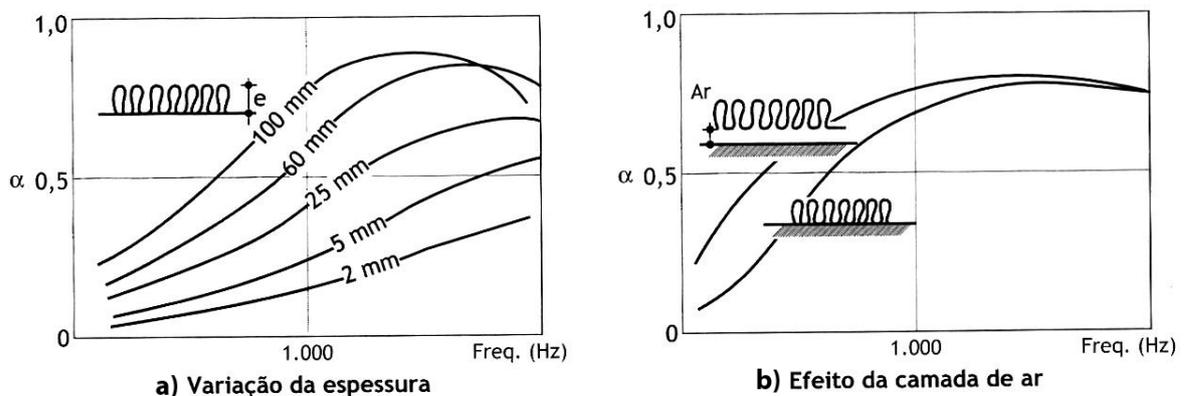


Figura 10: Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos e fibrosos. a) Variação da espessura; b) Efeito da camada de ar.  
 Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.

Com a diminuição da densidade, o material passa a absorver frequências mais altas (Figura 11a). E, por fim, com a aplicação de tinta o absorvedor se comporta de forma a apresentar um pico absorção em determinadas frequência (Figura 11b). As principais influencias são a variação de espessura e o efeito da camada de ar, pois modificam significativamente o comportamento acústico desses materiais (BISTAFA, 2006).

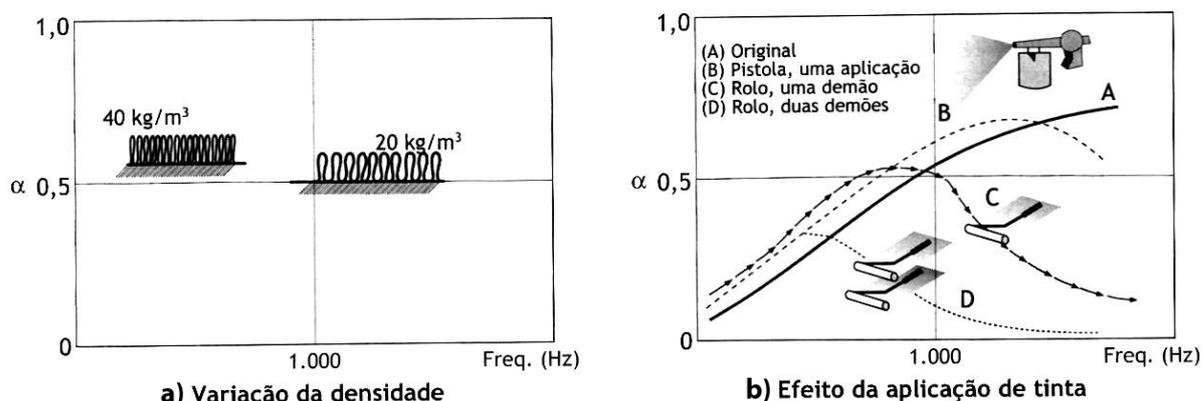


Figura 11: Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos e fibrosos. a) Variação de densidade; b) Efeito da aplicação de tinta.  
Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.

Com relação à lã de vidro, é conhecido como um absorvedor tipo fibroso, pois é constituído fundamentalmente de fibra de vidro, sendo um produto que existe sob muitas formas em termos de disponibilidade comercial no Brasil. De modo que podem ser encontradas na forma de mantas, feltros, cordões ou aplicada por processo de jateamento. Assim, as propriedades acústicas desse elemento absorvedor são bem conhecidas e previsíveis. O diâmetro das fibras geralmente podem variar de 2 a 15mm e a densidade aparente encontrada nos feltros, mantas e painéis está situada na faixa de 10 a 100Kg/m<sup>3</sup>. Essa material é bastante frágil, dessa forma, para melhorar sua resistência às vibrações e eventual fluxo de fluidos pode ser usado um processo de selamento com resina, todavia esse método faz com o material se torne combustível e, conseqüentemente, limita suas características quanto ao alastramento superficial do fogo (GERGES, 2000).

### 1.2.7. Membranas Ressonantes

As membranas ressonantes, também chamadas de painéis ressonantes ou vibrantes, são dispositivos especializados para a absorção acústica da baixas

frequências. Segundo Bistafa (2006), esses painéis são constituídos de chapas finas de madeira ou metal fixadas sobre espaçadores nas paredes ou no teto constituindo, assim, uma cavidade com ar em seu interior.

De acordo com Gerges (2000), a membrana é um elemento que não possui rigidez suficiente para num plano, exigindo que seja fixada em contornos. Logo, se essa fixação for feita paralelamente a uma placa rígida, o espaço de ar que existe entre ambas atuará como elemento de rigidez. Assim, o princípio de funcionamento desses painéis baseia-se na excitação da membrana pela incidência de ondas sonoras na sua frequência de ressonância e, conseqüentemente, a dissipação da energia acústica por meio do amortecimento interno do sistema.

O autor ressalta que é importante que a chapa vibre no seu primeiro modo de vibração e com a inserção de material absorvente na camada de ar desse sistema é possível aumentar a energia dissipada, assim como a largura do pico de absorção máximo na frequência de ressonância, resultando em uma curva quase triangular com pico na frequência de ressonância e caimento de 0,6 por oitava nas baixas frequências. A Figura 12 exemplifica a curva de absorção de um sistema de membrana ressonante com diferentes camadas de ar.

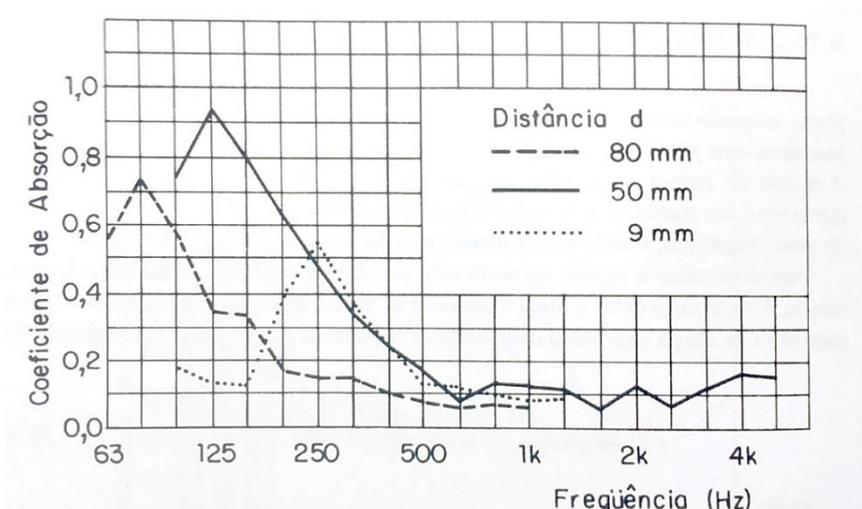


Figura 12: Curva simplificada do coeficiente de absorção do membrana ressonante.  
Fonte: Adaptado de GERGES, 2000.

Everest e Pohlmann (2009) ressaltam que esses painéis podem ser dimensionados para absorver frequências específicas, pois absorção das ondas sonoras por meio da vibração do sistema possui um pico de absorção que coincide

com a frequência de ressonância do dispositivo, ou seja, o pico de absorção máximo é a frequência de ressonância do sistema. Contudo, Bies e Hansen (2009) observam que a determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema também pode ser feita por um método empírico usando-se gráficos de previsão, publicados pela *Hardwood Plywood Manufacturers Association* em 1962, para estimar o comportamento do dispositivo. Assim, primeiramente determina-se a frequência de ressonância do sistema utilizando a Equação 05, segundo Bies e Hansen.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL}}$$

(Equação 05)

No qual,

$f_0$  = Frequência de ressonância do sistema, em Hz;

$m$  = densidade superficial do painel, em kg/m<sup>2</sup>;

$L$  = espessura da camada de ar, em m;

$\rho$  = densidade do ar, em kg/m<sup>3</sup>;

$c$  = velocidade do som, em m/s.

Entretanto, essa equação não inclui as dimensões do painel, logo Sendra (*apud* BIES; HANSEN, 2009) propõe a Equação 06 para um resultado mais preciso da frequência de ressonância para esses sistemas de absorção sonora.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL + 0,6L\sqrt{ab}}}$$

(Equação 06)

No qual,

$f_0$  = Frequência de ressonância do sistema, em Hz;

$m$  = densidade superficial do painel, em kg/m<sup>2</sup>;

$L$  = espessura da camada de ar, em m;

$\rho$  = massa específica do ar, em kg/m<sup>3</sup>;

$c$  = velocidade do som, em m/s;

$a$  = largura do painel, em m;

$b$  = comprimento do painel, em m;

Ainda, Bies e Hansen (2009) recomendam que seja aplicada uma correção no valor final da frequência de ressonância do sistema. Dessa forma, o resultado da Equação 06 deve ser multiplicado pelo valor obtido na Equação 07.

$$\sqrt{\frac{m}{m + 0,6\sqrt{ab}}}$$

(Equação 07)

No qual,

$m$  = densidade superficial do painel, em kg/m<sup>2</sup>;

$a$  = largura do painel, em m;

$b$  = comprimento do painel, em m;

Todavia, de acordo com Everest e Pohlmann (2009), Gerges (2000) e Silva (2002) a Equação 05 pode ser simplificada, pois os valores de densidade do ar e velocidade do som podem ser considerados uma constante e, portanto, pode-se estimar o funcionamento do absorvedor pela Equação 08.

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m d}}$$

(Equação 08)

No qual,

$f_0$  = Frequência de ressonância do sistema, em Hz;

$m$  = densidade superficial do painel, em kg/m<sup>2</sup>;

$d$  = espessura da camada de ar, em m.

Observando-se a estimativa prevista pela equação apresentada pode-se verificar que a espessura da camada de ar e o tipo de material usado para o painel são parâmetros que influenciam a determinação da frequência de ressonância do sistema. Logo, a redução da massa superficial do material causará um aumento na frequência de ressonância, assim como a diminuição da espessura da camada de ar do dispositivo também acarretará um aumento dessa frequência.

Ainda, a camada de ar desse tipo de sistema pode, também, ser preenchida com algum material absorvente, poroso ou fibroso, distanciado do painel para que possa também vibrar livremente, o que causará uma diminuição no pico de

absorção sonora do sistema e aumento da absorção nas frequências próximas à ressonância. Dessa forma, a introdução desses materiais na camada de ar diminuirá a eficácia do pico de absorção dimensionado para o sistema, entretanto ampliará a gama de frequências que o dispositivo pode absorver (GERGES, 2000).

O método empírico para estimar o comportamento da membrana ressonante apontado por Bies e Hansen utiliza, então, dois gráficos paramétricos que estão relacionados, para a determinação das propriedades desejadas do sistema de absorção sonora. Na Figura 13, são apresentados os coeficientes de absorção para camadas de ar preenchidas com material fibroso ou poroso, as curvas sólidas de A até F, e para camadas de ar vazias, as curvas tracejadas de G até J. Logo, observa-se no eixo das ordenadas o coeficiente de absorção sonora e no eixo das abscissas a razão da banda de frequência pela frequência de ressonância do sistema. Assim, o valor de 1.0 no eixo das abscissas corresponde à frequência de ressonância e, por conseguinte, ao pico de absorção sonora da membrana ressonante. As curvas de A a J apresentadas são estimativas do comportamento dos coeficientes de absorção sonora para as bandas de frequência.

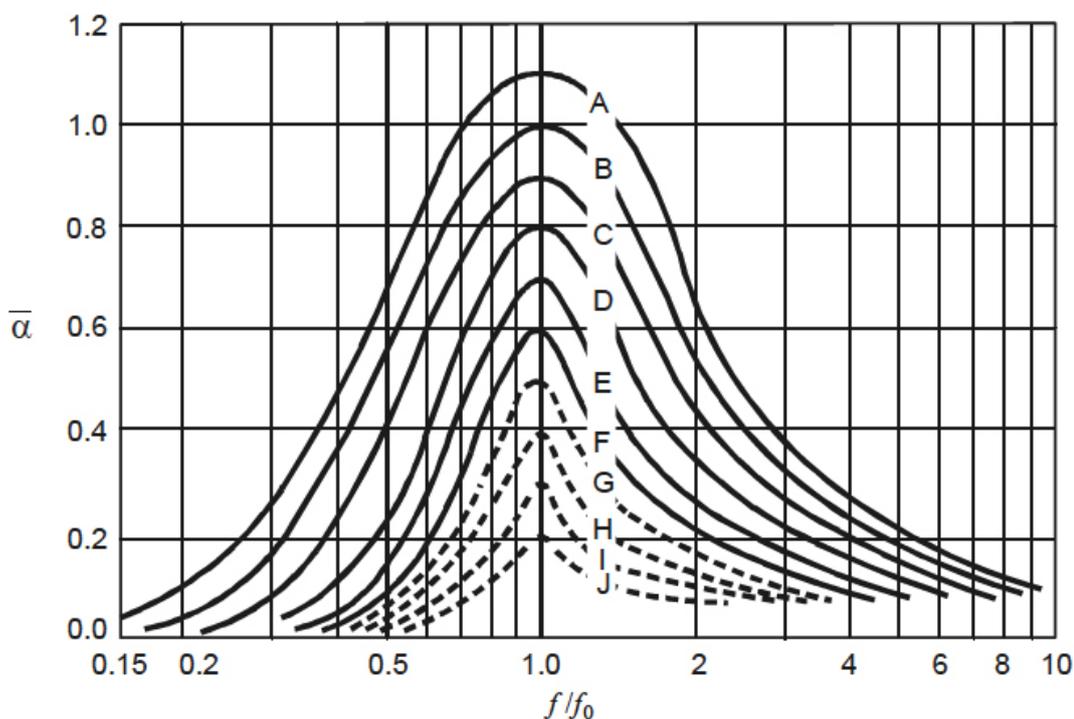


Figura 13: Curvas de previsão para o coeficiente de absorção sonora de Sabine.  
Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Na Figura 14 pode-se observar o gráfico que relaciona-se com a Figura 13 para complementar a estimativa de comportamento do dispositivo. Assim, apresenta as relações entre a densidade superficial do painel no eixo das ordenadas, a espessura da camada de ar no eixo das abscissas, a frequência de ressonância que o sistema pode apresentar nas diagonais “ $f_0$ ” e a associação com as curvas de absorção sonora da Figura 13 nas diagonais de A até J.

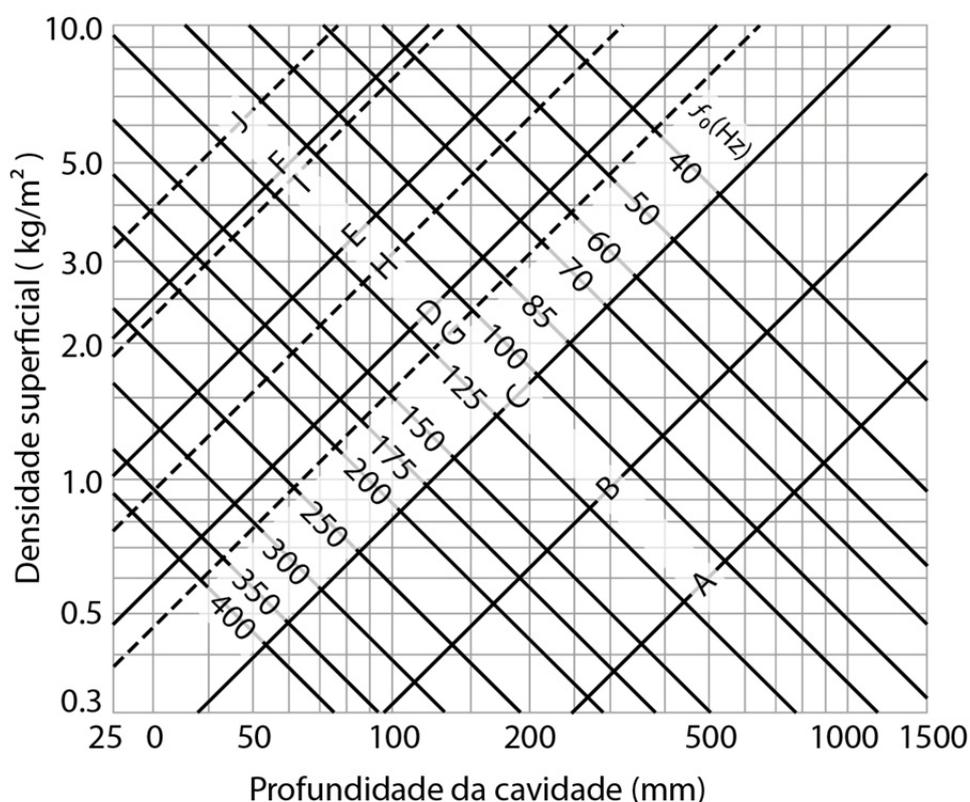


Figura 14: Curvas de previsão para painéis em compensado de madeira.  
Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Portanto, para a estimativa de comportamento de um dispositivo tipo membrana ressonante, a equação de previsão de frequência de ressonância deve ser utilizada em conjunto com os gráficos paramétricos apresentados para determinação das características do painel, como sua densidade superficial, espessura da cavidade de ar e possível coeficiente de absorção sonora.

Segundo Bistafa (2006) e De Marco (1982) vale ressaltar que o princípio de funcionamento da membrana ressonante, um painel leve e flexível que vibrará em seu primeiro modo, exige a fixação de suas bordas em uma estrutura rígida para

criar um “efeito tambor” sobre a membrana. Logo, recomenda-se um espaçamento mínimo de 0,4m entre os apoios rígidos.

Nesta pesquisa foi desenvolvido um dispositivo com esse princípio de funcionamento, pois, como poderá ser observado posteriormente, o material foco deste estudo possui características que podem ser ideais para a vibração da membrana e, assim, absorção das baixas frequências de acordo com o método de dimensionamento apresentado.

### 1.2.8. Ressonadores

Os ressoadores são elementos eficazes para a absorção das médias frequências. Também conhecidos como ressoadores de Helmholtz ou de cavidade, seu funcionamento consiste em uma única abertura cercada por paredes rígidas no qual se forma um gargalo que acarreta o amortecimento da onda sonora incidente. Assim, se assemelha a um sistema vibratório tipo massa-mola, pois o ar confinado na cavidade funciona como uma mola e o ar no gargalo funciona como a massa, e dessa forma, ocorre a dissipação da energia pelo amortecimento desse sistema e conseqüentemente a absorção sonora. Esses ressoadores também podem ser dimensionados para absorver diferentes frequências com a variação do valor da massa ou a rigidez da mola (KUTTRUFF, 2009). A Figura 15 a exemplifica o ressonador e também a representação de seu funcionamento.

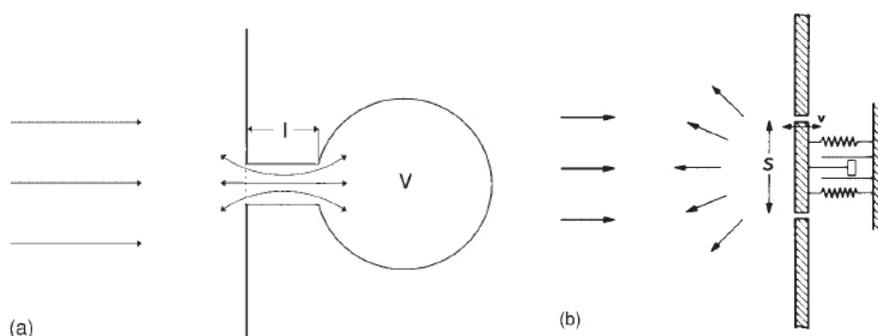


Figura 15: Ressonador e esquema de funcionamento.  
Fonte: Adaptado de KUTTRUFF, 2009.

Segundo Bistafa (2006), esses dispositivos possuem a atenuação acústica máxima em uma estreita faixa de frequências e sua curva de absorção é caracterizada pelo fator de qualidade. Logo, quanto mais definido for o pico dessa

curva, maior será o fator de qualidade. Também, podem ser associados à materiais absorvedores porosos ou fibrosos. Contudo, seu comportamento modifica-se com a diminuição do pico de absorção e a ampliação das faixas de frequências nas quais ocorrerá a atenuação da onda incidente. Ainda, seu funcionamento assemelha-se ao da membrana ressonante, pois sua absorção máxima ocorre na frequência de ressonância do sistema (EVEREST; POHLMANN, 2009). A Figura 16 mostra a diferenciação entre o dispositivo com alto e baixo fator de qualidade.

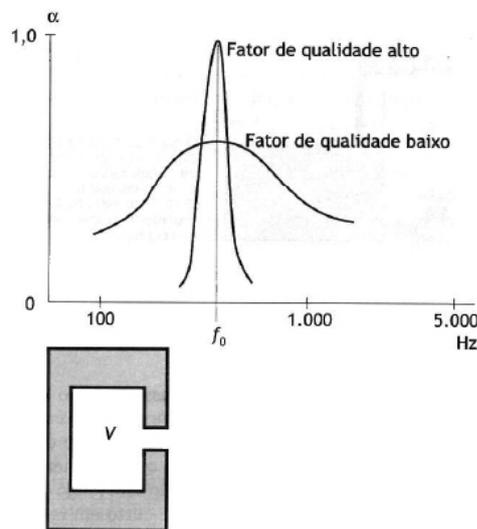


Figura 16: Curva de absorção do ressonador Helmholtz.  
Fonte: Adaptado de BISTAFA, 2006.

#### 1.2.9. NRC – *Noise Reduction Coefficient*

O *Noise Reduction Coefficient* é a média dos coeficientes de absorção sonora do material no qual se refere. Dessa forma, é a redução do coeficiente de absorção acústica de determinado material a um único número. Essa é uma ferramenta bastante utilizada para uma comparação rápida e aproximada entre diversos materiais e produtos disponíveis no mercado. Portanto é apenas o somatório dos coeficientes de absorção nas bandas de frequência analisadas dividido pela quantidade de frequências, de acordo com a Equação 09 (BIES e HANSEN, 2009).

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4}$$

(Equação 09)

### 1.3. O Bambu: Características Naturais e Construtivas

O bambu é um material de origem natural e vem se destacando como aliado aos derivados da madeira, e outros materiais industrializados, por meio da interface que seu processamento pode oferecer em diversos usos. É uma planta de origem tropical, perene e renovável, a qual anualmente produz colmos e não necessita de replantio. Apresenta-se também, como excelente sequestrador de carbono, logo tem grande potencial para recuperação de áreas verdes, além do rápido crescimento de seu broto, que leva de três a seis meses para atingir até trinta metros de altura (PEREIRA; BERALDO, 2007).

Algumas pesquisas divulgadas no II Seminário Nacional do Bambu (2010) demonstram que suas propriedades físicas com relação a resistência, rigidez e massa específica, superam as do concreto e da madeira e se equiparam as do aço. Entretanto, seu uso e desenvolvimento no Brasil ainda está incipiente, embora existam diversas pesquisas em andamento sobre esse material. Outro dado importante divulgado naquele Seminário mostra que no Brasil, especificamente no estado do Acre, existe uma das maiores concentrações de bambu nativo do mundo, a *Guadua* sp., superando os países asiáticos que cultivam essa planta há milênios.

Além da possibilidade de uso do colmo dessa planta em seu formato cilíndrico, algumas espécies, como a *Guadua* sp. e o *Dendrocalamus* sp., possibilitam a sua aplicação em forma de laminado colado. Para tanto, fatia-se o colmo do bambu para criar ripas que são coladas lado a lado, de modo que podem ser produzidos painéis, blocos, vigas e pilares, dentre outros. Assim, nos últimos dez anos, as pesquisas com relação ao laminado colado de bambu aumentaram significativamente, fato que pode ser constatado observando-se a produção da Rede Brasileira do Bambu – RBB. Portanto, será foco mais aprofundado dessa pesquisa a análise do potencial desse material para a utilização no condicionamento acústico de recintos fechados.

Suas características morfológicas apresentam analogias com as da madeira, podendo sugerir que suas qualidades acústicas podem ser similares, entretanto ainda não existem muitos estudos sobre seu uso para o tratamento acústico de ambientes. Algumas pesquisas têm demonstrado que o material possui

características desejáveis para o desenvolvimento de materiais para condicionamento acústico, como densidade, tamanho de suas fibras e porosidade em seu produto processado. Dessa forma, o estudo da acústica relacionada ao bambu constitui mais um importante uso para essa versátil planta.

### 1.3.1. Distribuição geográfica

O bambu pode ser encontrado naturalmente na maior parte do mundo com exceção da Europa, ocorrendo em grande quantidade nas florestas naturais, contudo existe também em plantações de larga escala e plantações familiares. Geralmente as plantas preferem os climas tropicais e subtropicais com média anual de temperatura entre 20°C e 30°C, apesar de também existirem espécies que suportam médias anuais entre 40°C e 50°C, como a *Oxythenanthera abyssinica* encontrada na África central e outras espécies que suportam temperaturas abaixo de 0°C, como a *Phillostachys mitis* encontrada na China. De acordo com a espécie, são distribuídos em diferentes altitudes de 100 a 800 metros, embora alguns também sejam encontrados acima dos 3000 metros, e latitudes que vão desde os 32° sul até 26° norte (LIESE, 1985).

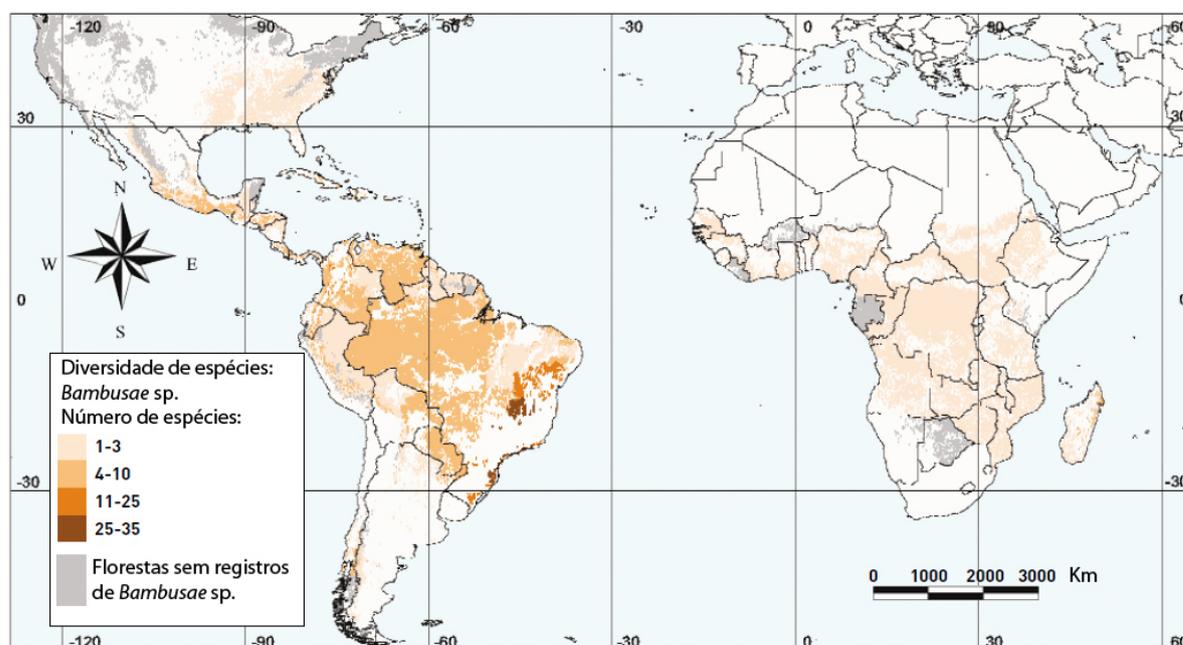


Figura 17: Mapa de diversidade de espécies na África e Américas.  
Fonte: Adaptado de UNEP/INBAR 2003.

Dados do INBAR (2004) mostram que estão catalogadas cerca de 70 gêneros de bambu e 1200 espécies e a maioria se localiza na Ásia e também distribuídas entre as zonas áridas e tropicais. Já nas Américas, segundo Filgueiras e Gonçalves (2004), o Brasil possui a maior diversidade de espécies de bambus das Américas com 34 gêneros e 232 espécies no qual 174 são consideradas endêmicas. Estão distribuídas pelos grandes biomas do território nacional com destaque para a mata atlântica, com 65% das espécies, seguida pela Amazônia, com 26% das espécies, e cerrado, com 9% das espécies. Ainda, os mapas sobre a biodiversidade de bambus publicados pela UNEP (2003) reforçam que no Brasil estão localizados grande parte da diversidade dessas plantas, como observado na Figura 17 (p. 35).

### 1.3.2. Aspectos morfológicos e anatômicos

Considerada por diversos autores como uma planta dotada de perfeita evolução natural, o bambu possui uma estrutura bastante simples e eficiente no qual combina perfeitamente a leveza, a força e a vitalidade. Assim, pode se adaptar a quase todos os biomas terrestres e possui um crescimento bastante acelerado quando comparado a diversas outras plantas de mesmo porte. Alcança sua dimensão máxima em apenas uma estação de crescimento e algumas espécies podem chegar a 20 metros de altura em apenas 3 meses (KIGOMO, 2007).

Os bambus estão classificados como plantas perenes na família das gramíneas *Poaceae* e subfamília *Bambusoideae*. No Brasil, os gêneros que apresentam maior número de espécies são o *Merostachy* sp., com 53 espécies, e *Chusquea* sp., com 40 espécies (FILGUEIRAS, GONÇALVES, 2004). Contudo, de acordo com Nelson (2006), foram descobertas diversas espécies do gênero *Guadua* na região de Sena da Madureira localizada entre os estados do Acre e Amazônia, o que significa uma grande concentração de matéria prima que pode ser a umas das maiores concentrações do mundo em bambus nativos.

Com relação a espécies consideradas exóticas, que não são nativas do Brasil, e com origem na Ásia, as espécies mais comuns são: *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris*, também conhecida como bambu verde, a *Bambusa vulgaris* da variedade *vittata*, conhecido como bambu imperial ou amarelo, *Dendrocalamus asper* e *Dendrocalamus giganteus*, conhecidos como bambu gigante e algumas

espécies de *Phyllostachys*. Essas espécies foram trazidas para o Brasil por imigrantes asiáticos e acabaram por adaptar-se muito bem, facilitando seu alastramento por todo o país (GRAÇA, 1988). Nesta pesquisa será utilizada a espécie *Dendrocalamus giganteus* para um estudo mais aprofundado devido ao seu grande porte e, também, ao fato de seu crescimento ser bastante comum na região centro-oeste.



Figura 18: Diferentes espécies de bambu.  
 Fonte: Adaptado de YU, 2007.

Os bambus, em suas inúmeras espécies podem apresentar características morfológicas e anatômicas bastante diferenciadas, porém algumas de suas partes fundamentais apresentam-se comuns a maioria das espécies. Em seu habitat natural essas plantas podem crescer a partir de sementes ou rizomas, assim, são formados basicamente por um rizoma e um colmo. O rizoma é a sua fundação subterrânea e o meio pelo qual a planta se reproduz de forma assexuada ou vegetativa e, também, armazena e transporta os nutrientes do solo. Essa estrutura pode ter duas classificações: são leptomorfos ou monopodiais quando seu crescimento é alastrante e são paquimorfos ou simpodiais quando seu crescimento é entoucerante (JANSSEN, 2000). Ainda, Lopes (2003) ressalta que existe um subgrupo que é chamado de metamorfos, os quais possuem características semi-

entouceirantes, de modo que seu rizoma é composto por uma combinação entre os leptomorfos e os paquimorfos (Figura 19).

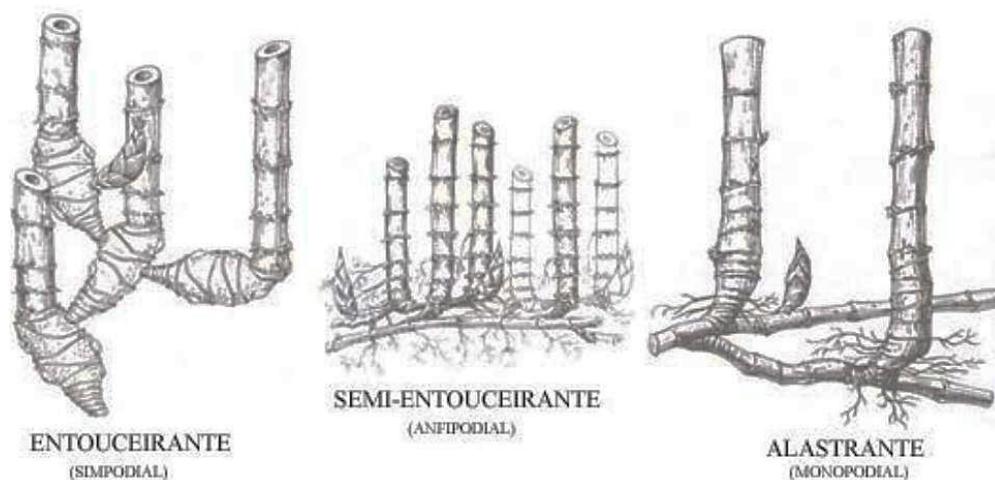


Figura 19: Tipos de rizomas.  
Fonte: Adaptado de KIGOMO, 2007.

Sua estrutura aérea denominada colmo é cilíndrica e dividida em seções por diafragmas, também chamados nós, e o trecho entre essas divisões é chamado entrenó. Na maioria das espécies esse entrenó é oco, porém existem algumas com essa cavidade maciça. Quando emerge do solo o novo colmo é protegido por bainhas que estão ligadas a cada nó e a medida que cresce desenvolve galhos e folhas. Ao contrário das árvores, o colmo do bambu não aumenta de diâmetro com o passar dos anos, somente ocorre seu amadurecimento, assim a estrutura lignifica e torna-se mais rígida e forte. Também, não há qualquer crescimento secundário na planta, pois o sistema de rizoma se desenvolve e amadurece e, dessa forma, novos e maiores brotos surgem do solo anualmente até que o tamanho máximo das espécies seja atingido. O tempo médio para que um colmo amadureça totalmente vai de 3 a 4 anos (KIGOMO, 2007).

A propagação do bambu difere bastante da maioria das plantas. Seu período de floração não é anual, pois essa planta raramente floresce, podendo acontecer em um período de 15 a mais de 100 anos. Portanto, sua forma de reprodução é principalmente feita por meio de estacas, apesar de também serem propagados pelo método de rizoma, microproliferação e cultura de tecidos (JANSSEN, 2000).

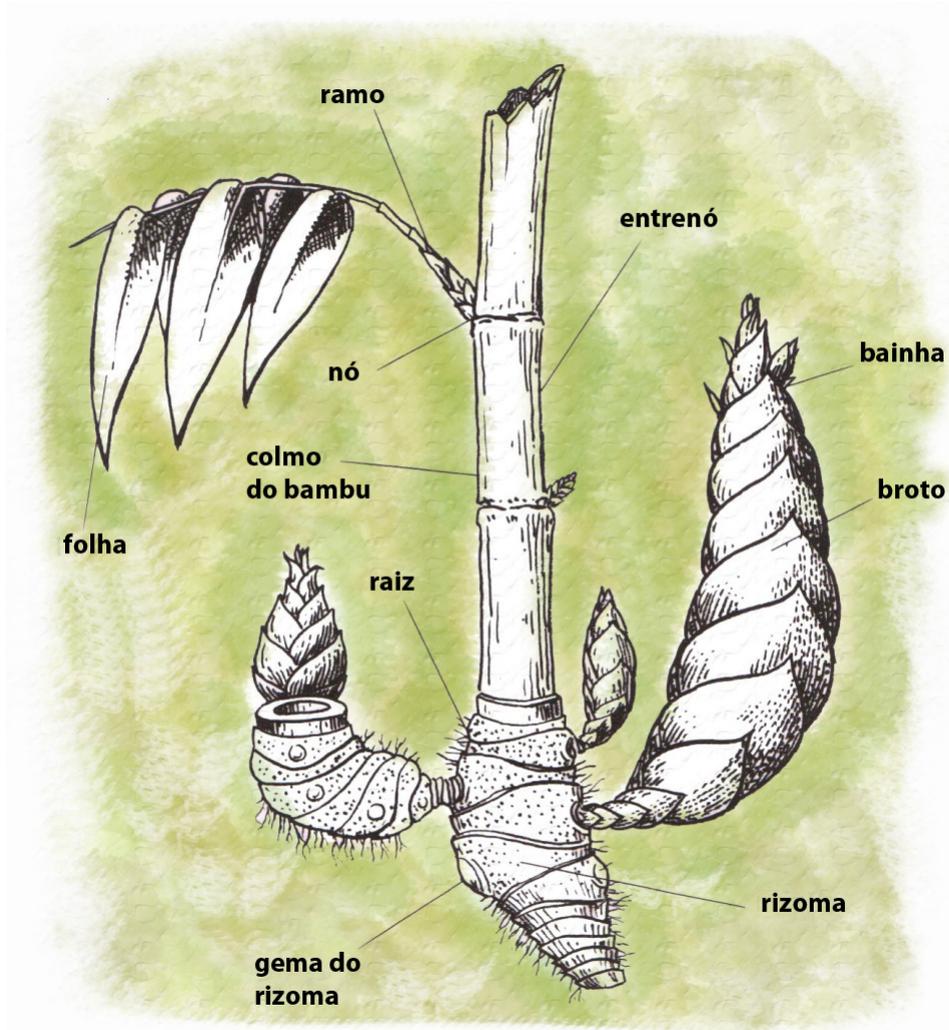


Figura 20: As partes do bambu.  
Fonte: Adaptado de CAN, 2013.

Do ponto de vista microscópico, a secção transversal de um colmo de bambu apresenta um arranjo bastante peculiar e demonstra uma relação harmoniosa entre construção e função. Segundo Zhang (2001), essas estruturas podem ser classificadas em três partes, são: a pele, constituída pelo córtex da secção transversal, ou seja, a camada externa que protege o bambu contra as intempéries do meio ambiente como umidade, ataques de microrganismos, insetos, entre outros.

Além de não apresentar nenhum feixe vascular nessa parte; a madeira de bambu, localizada entre a pele e a medula, e apresenta feixes vasculares e, parênquima, constituindo a principal parte estrutural e funcional do colmo; e a medula, sendo a superfície interior da cavidade dos entrenós, constituído de parênquima sem feixes vasculares.

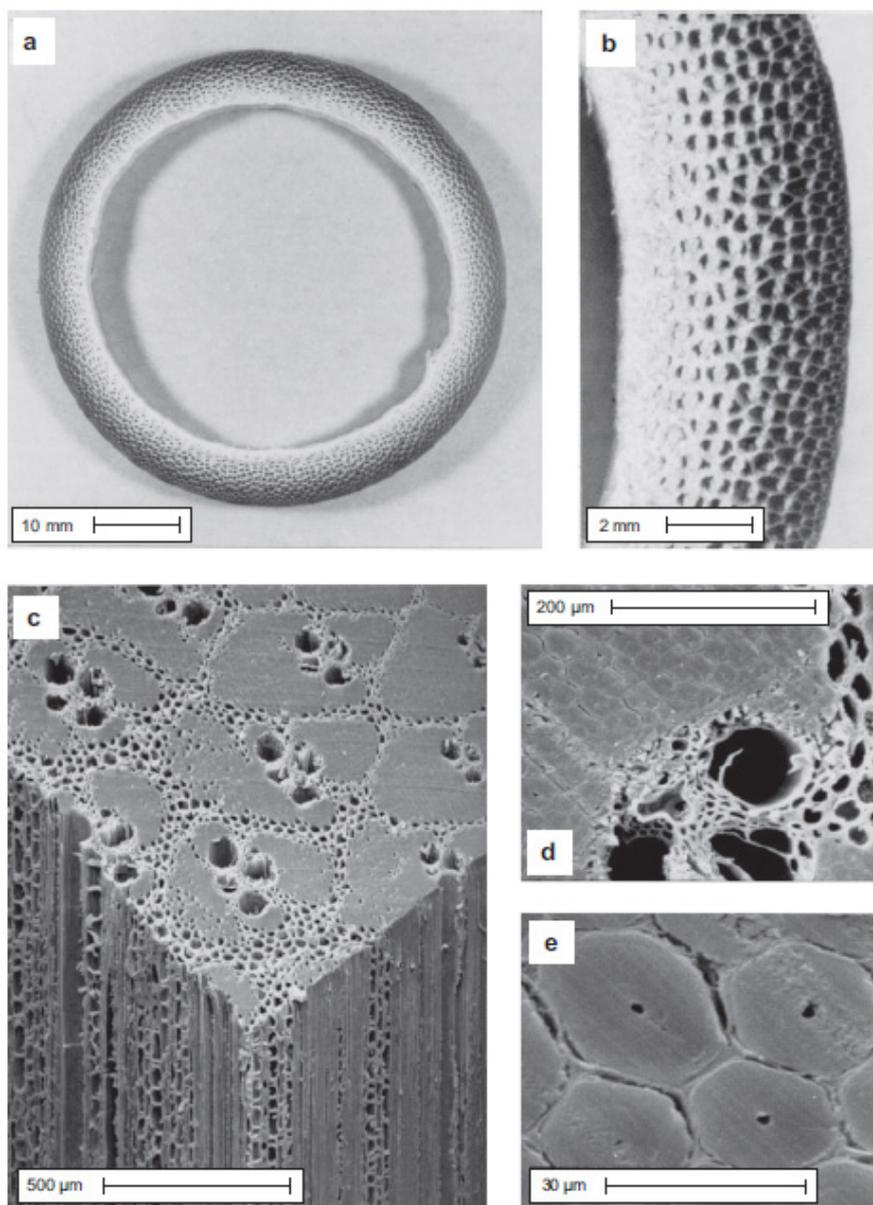


Figura 21: Micrografia ótica das microestruturas do bambu. (a) Corte transversal de um colmo. (b) Parede do colmo de bambu que mostra a distribuição radial de feixes vasculares. (c) Parede do colmo em maior ampliação. Feixes vasculares, fibras e parênquima estão alinhados com o eixo longitudinal do colmo. Os feixes tornaram-se quase totalmente esclerificado no tecido na periferia. (d) Feixes vasculares com ampliação. (e) Secção transversal das células individuais de fibra em um feixe de fibras.

Fonte: Adaptado de WEGST, 2008.

Segundo Liese (1985) o colmo é constituído de 50% de parênquima, 40% de fibras e 10% de tecidos vasculares. Assim, o parênquima forma o tecido base no qual os outros são incorporados constituindo um envolvente aglutinante para as fibras. Essas estruturas juntas serão a parte estrutural do colmo de bambu, responsáveis pela resistência mecânica da planta. As fibras se assemelham a um esqueleto, pois são a estrutura do colmo e estão sempre associadas ao parênquima. E os tecidos condutores são os feixes vasculares nos quais acontece o transporte de

nutrientes e água no colmo, sendo envolvidos também por fibras densas que os envolvem.

Com relação especificamente às fibras, no bambu são em geral mais longas que as da madeira, contudo possuem variações de espécie para espécie de bambu. Dentro de um colmo, o comprimento da fibra aumenta a partir do exterior, atinge sua extensão máxima na região central da parede e diminui essa dimensão em direção à cavidade interna, apesar de algumas espécies apresentarem o comprimento máximo na parede externa do colmo. Em geral, as fibras são mais curtas quando se aproximam do nó e mais longas quando se aproximam do meio do entrenó (LIESE, 1985).

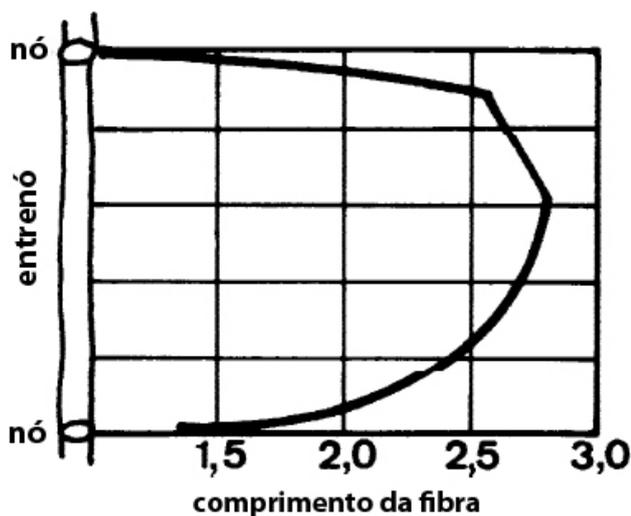


Figura 22: Variação do comprimento das fibras pelo comprimento de um entrenó.  
Fonte: Adaptado de LIESE, 1985.

Portanto, as características morfológicas e anatômicas do colmo do bambu apresentam essa planta bastante como um material potencialmente resistente e com propriedades mecânicas desejáveis. A concentração de fibras na parede externa do entrenó possibilita uma grande resistência à tração e compressão para que sua estrutura não seja destruída quando sujeita a intempéries climáticas e sua parte mais resistente localiza-se em sua metade superior. Dessa forma, a planta é uma solução simples e durável para resistir a altos esforços mecânicos e um possui um ótimo potencial como matéria prima para a fabricação de diversos componentes industrializados.

### 1.3.3. Propriedades químicas, físicas e mecânicas

Apesar das diferenças, a maioria das espécies de bambu utilizadas como matéria-prima para processamento industrial é composta basicamente por lignina, celulose e hemicelulose, constituindo uma estrutura semelhante à madeira, porém com porcentagens diferentes em suas microestruturas. De acordo com a idade essas proporções entre os componentes também se modificam com influências em suas propriedades mecânicas, pois o bambu lignifica e fortalece seu colmo na fase de crescimento e amadurecimento (LIESE, 1985). O Quadro 02 demonstra a diferença na composição química, em geral, entre o bambu e a madeira.

Quadro 02: Composição química do bambu e das madeiras com densidade semelhante.

	Celulose (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)
Bambu	55	25	20
Madeira (média densidade)	50	25	25

Fonte: Yu, 2007.

Com relação a suas propriedades físicas, de acordo com Zhang (2001), o bambu possui uma densidade que vai de  $400\text{kg/m}^3$  a  $800\text{kg/m}^3$  em sua massa seca. Ainda, o autor observa que esses valores podem se modificar, dependendo principalmente da densidade dos feixes vasculares e sua composição. Em regra geral, a densidade do colmo aumenta do interior para a parte externa e da base para o topo da peça. Esse valor também sofre influência do crescimento do caule e afinamento das paredes também aumentando a densidade desse material. No entanto, Janssen (2000) ressalta que a maioria dos bambus possui densidade que vai de  $700\text{Kg/m}^3$  a  $800\text{Kg/m}^3$  e que pode variar de acordo com a qualidade do local de crescimento, a espécie e a posição do colmo. Já a espécie *Dendrocalamus giganteus*, que será a espécie a ser utilizada nessa pesquisa foi caracterizada por Szücs *at al* (2010) com a densidade em  $822,38\text{Kg/m}^3$ .

A suas propriedades mecânicas são baseadas em testes laboratoriais nos quais são avaliadas as diversas resistências do material, como à tração, compressão, flexão, cisalhamento e módulo de elasticidade. Janssen (2000) demonstra no gráfico da Figura 23 (p.43) uma comparação entre bambu, concreto, madeira e aço com relação a sua rigidez, força e o volume do material.

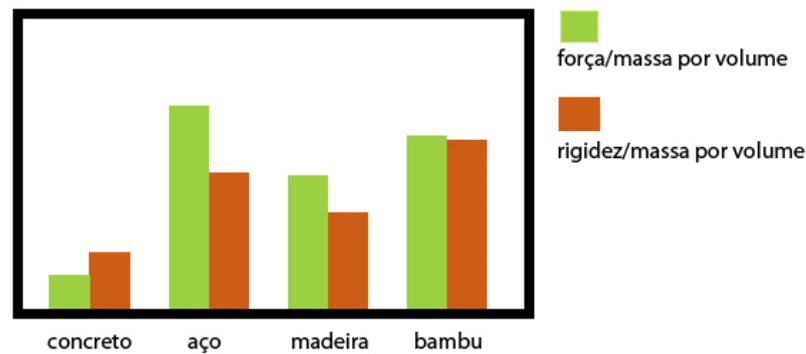


Figura 23: Comparação entre força e rigidez dos materiais.  
Fonte: Adaptado de JANSSEN, 2000.

Assim, pode-se observar que o bambu possui rigidez e força, de acordo com sua massa por volume, superiores as do concreto e da madeira e comparáveis as do aço. Zhang (2001) ressalta que o bambu é bastante similar à madeira como um material heterogêneo e anisotrópico, porém suas propriedades são bastante instáveis e em diversos aspectos mais instáveis que a madeira.

Pereira e Gonçalves (*apud* PEIXOTO, 2010) realizaram ensaios utilizando a espécie foco desta pesquisa na forma de bambu laminado colado para ensaios de tração, compressão, cisalhamento e flexão. Foram confeccionadas amostras de acordo com normas para a madeira, contudo demonstraram bons resultados para a aplicação em diversos fins, de acordo com o Quadro 03.

Quadro 03: Valores médios obtidos nos ensaios de resistência mecânica.

Ensaio	Resistência (MPa)
Dureza	352
Compressão paralela às fibras	55
Compressão normal às fibras	18
Tração paralela às fibras	195
Tração normal às fibras	2,5
Cisalhamento	10
Flexão	166

Fonte: Adaptado de PEIXOTO, 2011.

Entretanto, a característica física principal para esta pesquisa trata da densidade do bambu. Como visto anteriormente, sua densidade varia entre 0,50 e 0,90 g/cm<sup>3</sup>, todavia essa densidade pode ser influenciada pela região da parede colmo a qual está sendo analisada, pois as camadas externas, intermediária e internas apresentam densidades de fibras diferenciadas, assim como as regiões da base, meio e topo do colmo podem influenciar essa característica. Marinho (2012)

demonstra resultados de ensaios de densidade para espécie *Dendrocalamus giganteus* realizados por diferentes autores, demonstrados Quadro 04.

Quadro 04: Diferentes valores de massa específica aparente encontrados para a espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Densidade de Massa (g/cm <sup>3</sup> )	Autores/Ano
0,68 a 0,76	PAES <i>et al</i> (2009)
0,58 a 0,79	RIVERO (2003)
0,80	GHAVAMI E SOLANO (1995)

Fonte: Adaptado de MARINHO, 2012.

Ainda, Oliveira (2013) realizou ensaios de densidade, com auxílio do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro – LPF/SFB/MMA, para a obtenção da massa específica da espécie *Dendrocalamus giganteus* que é utilizada como matéria prima para as pesquisas do Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília CPAB/UnB, colhido na região do entorno do Distrito Federal, e encontrou o valor médio de 0,715g/cm<sup>3</sup>.

Outra propriedade que influencia a utilização do bambu é o seu teor de umidade. De acordo com Yu (2007) essa propriedade física é influenciada por cinco fatores, são eles:

1. Cada espécie possui diferentes quantidades de células do parênquima as quais relacionam-se com a capacidade de retenção de água;
2. As diferentes partes do colmo possuem teores de umidade diferentes, de modo que a base possui um valor mais alto que o topo e a parte interna um valor maior que a externa;
3. Os nós e entrenós que possuem uma diferença em até 25% em seu valores, com maior elevação dos valores para os nós;
4. A idade do colmo, pois a peça jovem possui um teor de umidade maior e mais uniforme que o maduro; e
5. A estação, no qual o teor de umidade no final da estação chuvosa é maior que o no final da estação seca.

Assim, depois de coletados, o teor de umidade dos colmos sofre influência direta do meio no qual está inserido, como temperatura, umidade relativa

do ar, dentre outros. Zhang (2001) estabelece um teor de equilíbrio da umidade da peça da espécie *Phyllostachys pubescens* em 15.7%. Já Szücs *et al* avalia o teor de umidade da mesma espécie em 10.59% e completa que o teor de umidade de equilíbrio da espécie *Dendrocalamus giganteus*, em seu experimento, foi de 10.79%.

O uso do material deve-se atentar para as características do apresentadas e aplicá-lo de acordo com o funcionamento adequado das propriedades físicas. Ghavami (2006) ressalta alguns pontos em que o bambu se destaca como matéria prima:

1. Baixo custo para a produção do material, pois a energia destinada a sua produção é muito inferior a de outros materiais, como o aço, o concreto e a madeira;
2. A plantação apresenta constante e elevada produtividade;
3. O custo em seu manuseio e transporte é reduzido devido a sua baixa massa específica;
4. Sua forma cilíndrica apresenta acabamento natural estruturalmente estável, dessa forma, pronto para diversas aplicações construtivas;
5. Resistência mecânica compatível com os esforços solicitantes a que estariam submetidas em estruturas adequadamente dimensionadas; e
6. Sua vida útil é comparável à expectativa de vida de outros materiais convencionais, de acordo com as condições ambientais em que é utilizado, tanto em ar livre como em conjunto com outros materiais.

Portanto, como observado nas comparações de dados e potencialidades do bambu como matéria-prima para diversos usos, as propriedades químicas, físicas e mecânicas apresentam desejáveis características para diversas aplicações do material. Contudo, Ghavami (2006) expõe que o uso desse material em grande escala, como insumo economicamente viável e passível de industrialização, pressupõe um estudo científico sistemático que envolva diversos aspectos de sua cadeia produtiva, que vão desde plantação a pós-imunização, além de necessitar de uma análise estatística bastante completa que englobe os níveis meso, micro e nano do colmo do bambu em sua complexidade formal. Dessa forma, poder-se-ia criar critérios confiáveis para o dimensionamento e emprego dos processos industriais e assim viabilizar economicamente seu uso em larga escala.

#### 1.3.4. Aspectos ambientais

O conceito do desenvolvimento sustentável ganha notoriedade e a busca de materiais ecologicamente responsáveis torna-se objetivo de inúmeras pesquisas. Belcher (*apud* JANSSEN, 2000) define esse desenvolvimento como a forma de melhorar o bem estar do ser humano sem degradar o meio ambiente, e Janssen (2000) acrescenta que existe uma grande dificuldade em satisfazer as necessidades das pessoas e, ao mesmo tempo, assegurar o uso sustentável das florestas naturais.

Dias (2004) ressalta que o desenvolvimento e o bem estar do ser humano estão interconectados e ambos dependem dos recursos da Terra e, dessa forma, é impossível de ser sustentado caso a degradação ambiental for sistêmica e contínua. Ainda, observa que os recursos do planeta são suficientes para as necessidades de todos os seres vivos, caso sejam explorados de forma eficiente e sustentada. Ao tratar o bambu como material para a indústria algumas características se destacam e podem tornar esta planta uma alternativa para a aplicação em vários usos. Vale lembrar que o conceito de desenvolvimento sustentável é bastante abrangente e, portanto, esta pesquisa irá restringir-se às características favoráveis que o bambu apresenta para contribuir com o meio ambiente.

Billing e Gerger (*apud* JANSSEN, 2000) em seu estudo feito sobre os benefícios ambientais do bambu na Costa Rica, constataram que esta planta desempenha os seguintes serviços ambientais, quais sejam:

1. Combate à erosão: o bambu possui a capacidade de crescer rapidamente, assim desenvolve um complexo sistema de rizoma que se estende pelo solo e o impede de ser lavado pela chuva pesada, e também a folhagem densa protege o solo das chuvas tropicais;
2. Nível de água do solo: o bambu consome bastante água do solo, entretanto, a planta repõe completamente esse gasto pela evaporação proporcionada por sua folhagem e pela camada de folhas mortas que deposita no solo. Dessa forma, aumenta a permeabilidade da terra ao seu redor e reduz o escoamento da água.

3. Fertilidade do solo: Com a diminuição da exposição do solo às intempéries climáticas e pelo depósito de folhagem morta na base dos colmos proporcionando material orgânico, o bambu promove a fertilização da terra em suas imediações;
4. Aumenta a qualidade da água do solo;
5. Cria uma estabilidade climática local por meio do equilíbrio da umidade e temperatura;
6. Promove a microfauna: A planta proporciona um ambiente rico para insetos, aves e alguns mamíferos, pois alimenta os insetos que, por sua vez, se tornam o alimento para aves. Algumas espécies de mamíferos também se alimentam do colmo ou de suas folhas.

Outro aspecto importante do bambu é a sua biomassa. Liese (*apud* JANSSEN, 2000) aponta que a biomassa característica do bambu depende principalmente da espécie, do clima, da qualidade do solo em que se encontra. Dessa forma, a produção do bambu varia entre 50 e 100 toneladas por hectare, de modo que 60% a 70% é relativo ao colmo, 10% a 25% aos ramos e 15% a 20% a folhagem. Ainda, de acordo com Kleinlein *et al* (2010), o bambu apresenta um potencial energético interessante e promissor. Esses dados estão em aproximadamente 19MJ/Kg quando comparado ao de madeiras de origem florestal que apresentam aproximadamente 20MJ/Kg. O Quadro 05 apresenta em resumo a biomassa relativa ao bambu e suas partes principais.

Quadro 05: Biomassa relativa do bambu.

Parte	Biomassa (tons/ha)	
	Verde	Seco
Colmo	82	53
Ramos	20	10
Folhas	17	9
Total	119	72

Fonte: Adaptado de JANSSEN, 2000.

Assim, Vos (2010) observa que o alto rendimento de biomassa por hectare plantado faz do bambu um material renovável e sustentável, sendo que a rendimento de uma plantação de bambu produz cerca 3 a 4 vezes mais biomassa que uma floresta média. Outra vantagem da planta é o seu crescimento rápido, no qual o bambu atinge seu crescimento máximo em um período de 6 meses, o que

proporciona, segundo Lugt (*apud* VOS, 2010), uma grande capacidade de fixação de carbono que varia entre 2 e 2,5 vezes maior do que uma floresta de produção média. Barbosa *et al* (2007) acrescenta que o carvão de bambu ainda apresenta características especiais como a geração de íons negativos, a emissão de grande quantidade de raios infravermelhos, o efeito eletromagnético e antibacteriano e, ainda, possui grande quantidade poros ou micro orifícios.

Mais uma vantagem na utilização do bambu é a energia necessária para a produção dos materiais, pois os que estão disponíveis no mercado consomem bastante energia para a sua produção, assim, Ghavami (1990) demonstra uma comparação desses materiais no Quadro 06.

Quadro 06: Energia necessária para produção dos materiais.

Material	bambu	Madeira	Concreto	Aço
MJ/m <sup>3</sup> /MPa	30	80	240	1500

Fonte: Adaptado de GHAVAMI, 1990.

Outro ponto importante para o favorecimento do bambu como material não convencional aplicável à indústria no Brasil foi a criação da lei Nº 12.484 de 8 de setembro de 2011 que dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu – PNMCB. Essa lei constitui um passo importante na implantação da cultura do bambu no Brasil, pois cria instrumentos para o incentivo de produção dessa matéria prima. São pontos importantes:

- a. Institui a PNMCB por meio de ações governamentais e empreendimentos privados;
- b. Tem como diretrizes o desenvolvimento tecnológico do manejo sustentado, do cultivo e aplicações do bambu. Essa última pode influenciar diretamente essa pesquisa, pois promove o desenvolvimento tecnológico das aplicações do material;
- c. Coloca como instrumento da lei, a certificação de origem e de qualidade dos produtos destinados à comercialização;
- d. Incentiva a pesquisa nos órgãos competentes para desenvolvimento tecnológico das aplicações dos produtos e subprodutos do bambu, além de promover pesquisas na área de manejo sustentado, cultivo e serviços ambientais.

Assim, com a abertura da possibilidade de incentivo governamental para o plantio do bambu, em breve esse material poderá estar amplamente disponível no mercado. Dessa forma, pesquisas para sua aplicação em produtos são fundamentais para sua inserção definitiva na cultura brasileira e o desenvolvimento tecnológico do material.

#### 1.3.5. Usos e aplicações do bambu

O bambu como planta e material para a utilização pelo ser humano possui inúmeras aplicações que foram desenvolvidas ao longo dos séculos por diferentes culturas e comunidades. Sua fibra unidirecional e seu crescimento rápido e ao mesmo tempo sua alta resistência à tração e compressão o qualifica como um material versátil que pode ser adaptado para a utilização em formas simples e complexas. Dessa forma, essa planta, mais que qualquer outra, desempenhou um papel fundamental na evolução humano (CAN, 2013).

A utilização do bambu como matéria prima se estende em formas tradicionais, como seu emprego no artesanato, na construção rural, alimento, utensílios e outros mais e processadas como as chapas, carvão, papel, laminados e diversos outros, sendo classificado com mais de 1500 diferentes usos (DEBOER *et al*, 2000). Nesta pesquisa não se pretende abordar os usos tradicionais do material visto que se propõe o desenvolvimento de um protótipo com o bambu processado. Contudo serão abordados alguns materiais industrializados que utilizam o bambu como matéria prima.

Na América do Sul seu uso na construção já foi bastante popular com a *Guadua* sp., uma espécie de bambu nativa, utilizada nas edificações tanto populares quanto às de alto custo até o final do século XIX quando uma serie de incêndios catastróficos na Colômbia desacreditou seu uso relegando apenas às classes com baixo poder aquisitivo (VELEZ *apud* DEBOER, 2000).

Assim, durante grande parte do século XX as construções de bambu foram tratadas como provisórias e temporárias, pois o desconhecimento e degradação do material levariam a estrutura a ruir. Porém o recente desenvolvimento de pesquisas relacionadas à utilização do bambu como matéria prima para a construção vem estabelecendo novos parâmetros e demonstrando que

essa planta pode ser utilizada em diversas partes da estrutura de uma construção, como treliças, telhado, reforço de concreto, divisórias, piso, mobiliário, etc., considerando sua forma cilíndrica.

O *International Bamboo Building Design Competition* de 2010 apresentou diversas edificações construídas em bambu que resgatam o potencial construtivo do material em sua forma natural, como pode ser observado na Figura 24.



Figura 24: Wind and Water Café, Ho Chi Minh City.  
Fonte: Adaptado de HERKINSON; GEENBERG, 2010.

Existem ainda muitos outros exemplos da utilização do bambu na construção, como pontes, galpões, casas, coberturas e diversos mais. A competição de arquitetura em bambu de 2010 é um dos muitos eventos nos quais se promove a utilização do bambu na construção civil.

Uma importante área de produção que está sendo explorada, tanto no Brasil como no exterior é o processamento do bambu em ripas e sua posterior colagem. Nessa forma, o bambu torna-se matéria prima para uma infinidade de produtos, pois a chapa de bambu produzida se equipara à madeira e pode substituir seu uso na maioria das ocasiões, entretanto, vale lembrar que o tratamento adequado ao uso deve ser aplicado ao material.

Ainda, grandes estruturas podem ser construídas nesse processo, com o bambu laminado colado resultante dessa transformação, pois esse uso pode ser adaptado do método de produção utilizado para estruturas em madeira laminada colada. Assim, peças constituídas a partir de ripas podem proporcionar grandes vãos

para a arquitetura, além da estrutura predial resistente e durável, semelhante ao que existe para a madeira disponível no mercado. Yu (2007) classifica os usos para a ripa resultante do processamento do bambu para uma melhor compreensão do material, logo, na Figura 25 pode-se observar as aplicações desse bambu fatiado.

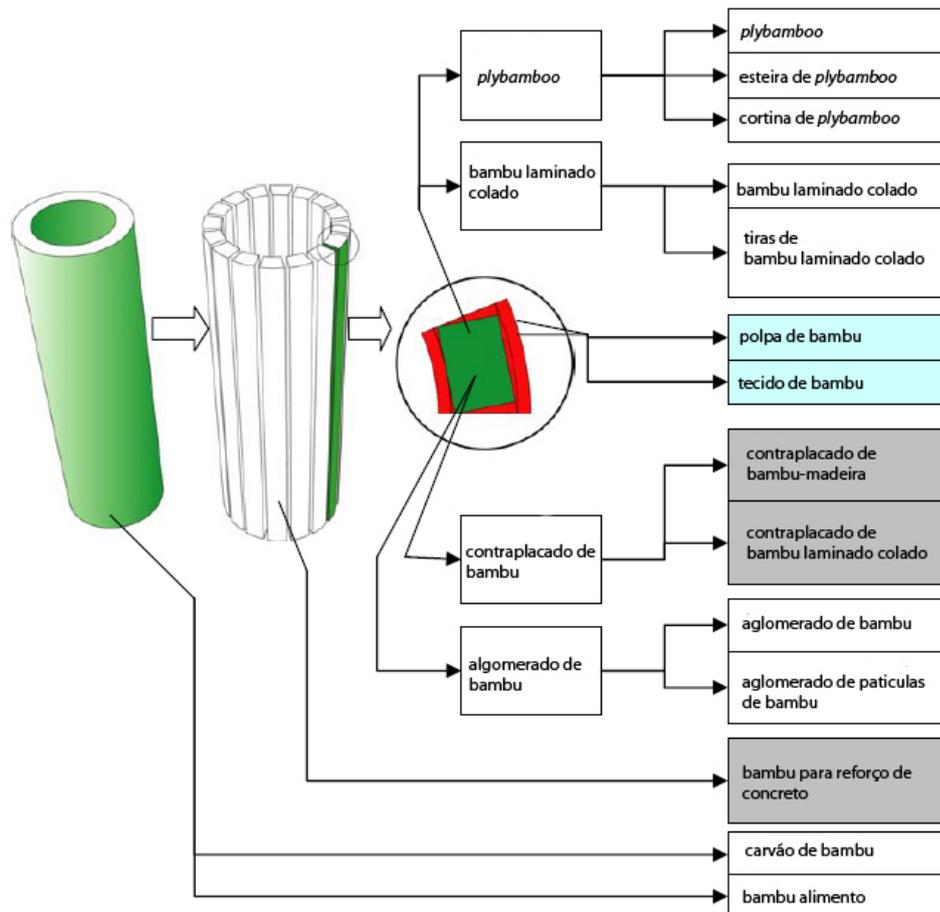


Figura 25: Aplicações do bambu fatiado.  
Fonte: Adaptado de YU, 2007.

O processamento do bambu para a fabricação de celulose e papel também é um importante área no qual a planta pode ser empregada. Em diversos países do mundo essa área de produção já se encontra consolidada, como na China e Índia, e essa transformação do bambu em papel pode ser feita de modo tradicional ou industrial, sendo que qualquer espécie de bambu pode ser usada para a fabricação do papel, contudo deve atentar para aquelas que produzirão uma fibra mais forte e de aparência mais clara (DELANG, 2006).

No Brasil essa produção também se encontra consolidada pela produção de celulose e papel das empresas CEPASA e Itapajé do Grupo Industrial João

Santos. A plantação de *Bambusa vulgaris* no totaliza 10.000 ha no estado de Pernambuco e 20.000 ha no estado do Maranhão com objetivo exclusivo de fornecer de matéria prima para a produção de papel e celulose. Assim, o papel produzido utiliza 100% da fibra virgem do bambu e também podem ser adicionadas aparas em casos específicos, de acordo com o tipo de papel a ser produzido. Segundo a CEPASA, o papel que é produzido a partir da polpa do bambu é caracterizado pela elevada resistência mecânica, devido às fibras longas, e destinados à produção de cartão, papelão ondulado, sacaria e diversos outros. Salgado e Godoy Jr. (2002) apontam que as principais espécies utilizadas para a produção de celulose são a *Bambusa vulgaris*, *Bambusa vilgaris var. vitata*, *dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys babusoides*.

Portanto, pode-se perceber a quantidade de usos industriais que se pode fazer do bambu e ainda vislumbrar várias outras aplicações. Contudo, para essa pesquisa, o processo de laminação do bambu para a confecção de chapas será o mais importante, de forma a ser abordado especificamente.

#### **1.4. O bambu laminado colado (BaLC)**

Depois de apresentados alguns dos usos que podem ser feitos do bambu como matéria prima, esta pesquisa pretende aprofundar na utilização do material para processamento na forma de bambu laminado colado (BaLC), com foco no desenvolvimento de painéis de bambu, pois será o foco de análise para o uso que será proposto.

Vale ressaltar que no II Seminário Nacional do Bambu – Consolidação da Rede Brasileira do Bambu, realizado em 2010, foram apresentadas algumas pesquisas que demonstraram que o BaLC tem grande potencial para ser aplicado a inúmeros usos, como na construção civil pois apresentou capacidade de resistência satisfatória para a fabricação de estruturas ou mesmo na confecção de mobiliário, que já está em produção no Brasil pela indústria moveleira de Santa Catarina. Já, em outros países, como China e Índia, o desenvolvimento do processo industrial para a fabricação do BaLC encontra-se bastante difundido com a utilização em uma série de produtos, como diversos componentes de uma construção, pisos, forros, divisórias e estrutura, dentre outros.

#### 1.4.1. O sistema de ripas aplicado ao bambu

A possibilidade de uso do bambu laminado colado tem como referência a mesma aplicação que é usada na madeira, pois constitui-se da sobreposição de lâminas com diferentes comprimentos unidas por meio de encaixes, adesivos ou parafusos, de acordo com o uso desejado. Essa configuração proporciona uma utilização racional tanto do bambu quando da madeira como matéria prima, pois admite que o construtor faça a escolha das peças que estão em condições ideais para a aplicação em determinado fim, e assim, pode eliminar o material que se encontra defeituoso. Logo, pode-se obter peças com elevada resistência e durabilidade, além de dimensões diferenciadas das encontradas no mercado (PEIXOTO, 2011).

Assim, o processamento do bambu elimina algumas das restrições que a forma cilíndrica pode acarretar, como a limitação de diâmetro de peças devido ao fato de secção proporcionada pelo laminado ser virtualmente ilimitada sendo gerada pela colagem face a face de cada lamina; o problema das juntas entre as peças tubulares, pois o bambu em sua forma natural não possui sempre as mesmas dimensões, necessitando de diversos ajustes para uma união confiável entre componentes; a resistências às intempéries climáticas, pois as laminas são tratadas e o adesivo é aplicado de acordo com a utilização; e diversos outros fatores, pois as laminas podem gerar um infinidade de formas e usos.

Almeida (2006) observa que vários produtos derivados do bambu, tais como o MDF, OSB e o *Plyboo* têm o potencial de articular com o uso das madeiras, e dessa forma, contribuir para a conservação das florestas nativas. Contudo, o mesmo autor alerta que as informações sobre o bambu no Brasil ainda são escassas, de modo que não há dados estatísticos sobre as demandas socioeconômicas e o consumo dessa matéria-prima. Assim, a importância do bambu e seu mérito científico, cultural e tecnológico são evidenciados em grande parte dos estudos existentes sobre a planta, embora ainda estejam restritos a determinados setores, como por exemplo, o acadêmico.

A tecnologia desenvolvida para o laminado de madeira pode, então, ser aplicada ao bambu, porém deve-se atentar para as diferenças entre esses materiais,

pois, face à madeira, o bambu possui qualidades anatômicas distintas em seus componentes, como visto anteriormente, e se o modo de fabricação não for adaptado para esse material, podem surgir inúmeros obstáculos para esse desenvolvimento. Stamm (*apud* PEIXOTO, 2011) observa que existem várias experiências com a produção dos contraplacados de bambu em lugares como a Colômbia, todavia exemplos da aplicação dessa tecnologia existem há mais de 20 anos na China, com a utilização desse material para a produção de pisos. Logo, utilização do bambu acarretou um desenvolvimento tecnológico de máquinas e técnicas de processamento que alcançaram um alto padrão de acabamento, qualidade e eficiência dos produtos laminados.

Zhang (2001) acrescenta que os painéis à base de bambu começaram a ser fabricados desde a década de 1960 inspirados nas conquistas tecnológicas dos laminados de madeira. Logo, o entendimento aprofundado das características de ligação entre as partes desse material gerou o desenvolvimento de vários tipos de painéis de bambu e comparando-o com os painéis de madeira, estes novos produtos demonstraram as seguintes características:

1. Grandes dimensões, pequena deformação e tamanho estável;
2. Alta resistência, boa rigidez e alta resistência ao desgaste;
3. A estrutura e dimensões podem ser reguladas de acordo com a exigência de uso, assim como a resistência e rigidez podem ser reguladas;
4. Resistência a insetos e ao apodrecimento;
5. Propriedades mecânicas melhoradas em relação às diferentes direções, quando comparado à resistência do bambu em seu formato natural;
6. As superfícies dos produtos podem ser alinhadas e decoradas em um infinidade de formas, variando de acordo com a utilização.

Dessa forma, o laminado de bambu em forma de *Plybamboo* (compensado de bambu laminado) se apresenta-se como o uso mais comum dessa matéria prima, assim como o *Plywood* (compensado de madeira), os quais são formados por camadas alternadas do material dispostas em ângulo reto. São produzidos principalmente em países como China, Índia, Filipinas e Indonésia.

Apesar de que, recentemente, já se produz esse material em países da América Latina, como Equador, Costa Rica e Colômbia que adaptaram essa tecnologia aos bambus disponíveis em suas regiões (PEIXOTO, 2011).

Portanto, tendo em vista as possibilidades que o bambu apresenta como matéria prima para a produção industrial, nessa pesquisa pretende-se abordar o desenvolvimento do bambu laminado colado (BaLC) para a produção de painéis contraplacados e avaliação seu desempenho em laboratório, considerando o uso especificado.

#### 1.4.2. Os painéis em bambu laminado colado

Assim como a madeira, o bambu é um material orgânico natural com características heterogêneas e anisotrópicas, contudo existem diferenças na morfologia, estrutura e composição química entre eles, demonstrando propriedades físico-mecânicas específicas. Em comparação com a madeira, o bambu tem grande força e rigidez e ótima dureza de modo que pode ser facilmente processado. Todavia, os pontos fortes de um modo geral podem se transformar em deficiências caso o material não seja compreendido para que ocorra um aproveitamento bem sucedido dos recursos que oferece (ZHANG *et al*, 2001). Ainda, de acordo com esse autor, pode-se elencar as seguintes características específicas desse material:

1. Processamento simples: O material de bambu possui a grã direita e pode ser talhado em lascas finas (com vários micros de espessura) com ferramentas simples;
2. Pequeno diâmetro, cavidade interna e conicidade: O diâmetro do bambu é menor que o da madeira. As árvores de grande porte podem chegar 2m de diâmetro e as de pequeno porte ainda tem dezenas de centímetros de diâmetro, enquanto que o bambu mais fino tem cerca de 2cm de diâmetros e os maiores com cerca de 30cm de diâmetro;
3. Estrutura desigual: A diferença principal entre essas partes se relaciona a sua densidade, teor umidade, coeficiente de retração, resistência e aderência, de modo que Zhang (2001) alerta que essas características podem levar a influências negativas no processamento do material;

4. Características anisotrópicas evidentes: Tanto o bambu quanto a madeira são materiais anisotrópicos. Os feixes vasculares do bambu são organizados de forma paralela conferindo ao material a característica de ser facilmente dividido;
5. Suscetível a danos causados por insetos ou fungos: Em comparação com a madeira, o bambu possui mais nutrientes para insetos e fungos;
6. Transporte com menos despesas e dificuldade de armazenamento: Devido ao seu baixo peso pelo volume de carga a ser transportado, o bambu possui boas qualidades para transporte a longas distâncias, entretanto para seu armazenamento existem dificuldades. Os colmos não podem ser armazenados a céu aberto por muito tempo, nem podem permanecer em seu local de corte.

Com a observação dessas características do bambu como material, Zhang (2001) pondera que os métodos mais eficientes empregados na indústria da madeira não devem ser diretamente aplicados ao processamento do bambu. Portanto, a adaptação das técnicas de produção e o conhecimento do material são fundamentais para alavancar o bambu laminado colado como alternativa de produção para concorrer com os demais materiais presentes no mercado.

Existem diversos tipos de painéis fabricados em bambu e geralmente são processados por uma série de transformações químicas e mecânicas que envolvem a manufatura sob pressão e temperaturas adequadas, com o auxílio de adesivos dimensionados de acordo com a capacidade de ligação que a matéria prima oferece. Em sua maior parte, os painéis variam de 2mm a 40mm de espessura, contudo essas dimensões convencionais podem ser alteradas conforme as exigências do uso aplicado (ZHANG *et al*, 2001).

Segundo o mesmo autor, esses painéis podem ser classificados de acordo com a tecnologia aplicada a sua fabricação e o tipo de material processado utilizado no painel, conformando várias denominações diferenciadas. Esta pesquisa se concentrará nos painéis produzidos a partir de ripas de bambu, no qual o colmo é fatiado em ripas planas com determinada espessura, podendo criar um material com diversas camadas em sobreposição. Logo, podem ser classificados como:

- a) O *Plybamboo*: As ripas de bambu são trabalhadas em alta temperatura com a compressão e aplainamento do material, formando chapas com espessura entre 60mm e 120mm e posicionadas nas direções transversal e longitudinal alternadamente. Geralmente são prensadas a quente e usa-se o adesivo com base em fenol-formaldeído, entretanto nesse tipo de prensagem podem ocorrer fissuras;
- b) Chapas de laminado colado de bambu: As ripas são cortadas e aplainadas com duas serras paralelas fixas de modo a obter a seção desejada para o uso. Em seguida são dispostas no mesmo sentido e coladas com uma prensagem bidimensional, resultando em um produto multicamadas e com possibilidade de grande dimensão;

Moizés (2007) completa que as características estruturais que formarão o produto final são diretamente relacionadas a disposição das ripas nesses materiais, que podem ter uma ou mais camadas com diferentes disposições em suas ripas. A Figura 26 exemplifica essas disposições estruturais dos painéis.

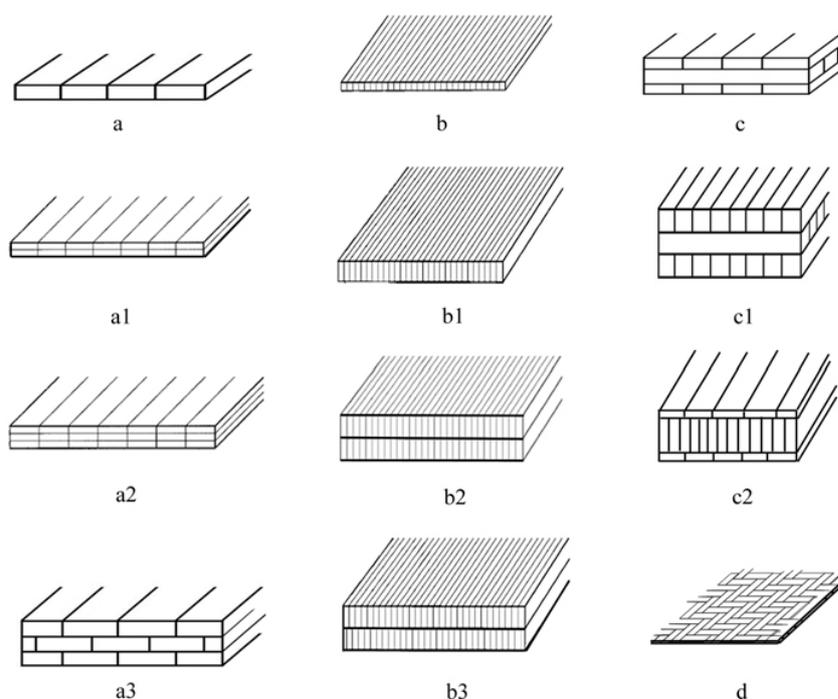


Figura 26: Disposições estruturais de painéis de BaLC. Em a, a1, a2, a3) Painéis de ripas coladas na horizontal; b, b1, b2, b3) Painéis com ripas coladas na vertical; c, c1, c2) Painéis com ripas coladas em direções invertidas (contraplacados); d) Painéis com tiras entrelaçadas.

Fonte: Adaptado de MOISÉS, 2007.

Vos (2010) ressalta que os compósitos de bambu originários da China estão bastante desenvolvidos tecnologicamente, conformado um material estável e com propriedades interessantes. Porém esse progresso na aplicação do material enfrentou dificuldades como inchaço e delaminação causados pela água e ainda suas propriedades podem variar, pois dependem do tipo de processo de produção e seus parâmetros específicos, como, por exemplo, uma pressão diferente provoca densidades diferentes no material.

#### 1.4.3. Os adesivos

Os adesivos são compostos químicos naturais, derivados de origem animal ou vegetal, ou compostos sintéticos. De modo que podem ser definidos como materiais com características aderentes os quais formam uma substância que possui a capacidade de manter unidos outros materiais por meio de suas superfícies (IWAKIRI *apud* PEIXOTO, 2008). Ainda, Peixoto (2008) ressalta que são substâncias com propriedades de aderência a um determinado substrato, que podem manter unidos vários substratos de um único material ou de materiais distintos ligados face-a-face.

Existem algumas recomendações que devem ser seguidas para a obtenção de uma ligação adesiva satisfatória. Carrasco (*apud* PEIXOTO, 2008) observa que essas recomendações são aplicadas tanto para a madeira como para o bambu e devem considerar os seguintes aspectos:

1. A densidade, a porosidade e as estruturas anatômicas, no caso do uso com bambu processado;
2. As características da superfície a ser colada, como rugosidade, textura e capacidade de absorção, entre outras;
3. A variação dimensional das peças e a disposição dos nós;
4. A resistência aos esforços estáticos e dinâmicos;
5. O teor de umidade do material, pois tanto o bambu quanto a madeira têm sua durabilidade comprometida por mudanças no teor de umidade que podem causar alterações dimensionais na peça; e

6. A anisotropia do material, pois existem diferenças entre as diversas propriedades do bambu ao longo de seu colmo.

De acordo com Zhang (2001), os adesivos utilizados na fabricação de painéis de bambu para ambiente interno são em geral compostos por resina de ureia-formaldeído ou outros tipos similares. Contudo, se o uso exigir que o material seja resistente à água e outros elementos, deve ser usado um adesivo de alta qualidade com base em resina de fenol ou alguns tipos similares.

Ainda, caso o uso desejado necessite de uma grande resistência e alto rendimento para o material é recomendado o uso de resina de fenol alcoolsolúvel, ou resina fenólica modificada com resorcina, porém esse tipo de adesivo possui uma quantidade elevada de hidroxibenzeno o qual polui o ambiente e pode afetar a saúde dos trabalhadores, além de ter um preço mais elevado no mercado.

Dessa forma, Peixoto (2008) ressalta que os fatores que determinam o uso de um determinado adesivo estão condicionados a sua durabilidade, além de outros fatores como condições de exposição ao ambiente, tempo de preparação e aplicação de adesivos, processo de cura e outros mais. Assim, recomenda os adesivos de acordo com o uso final que se deseja.

As resinas fenólicas são recomendadas para uso em laminados colados estruturais, como a fenol-formaldeído, as quais são bastante duráveis mesmo quando imensas em ambientes com grande variação de umidade de temperatura. São também resistentes a solventes, óleos, preservativos, e retardantes químicos de combustão. Ainda, a resina de melanina-formaldeído possui propriedades semelhantes à anteriormente citada, recomendada para uso interno e externo, porém seu uso é pouco explorado devido ao seu alto custo.

Outro adesivo bastante resistente é o resorcinol-formaldeído suportando a exposição a grande variação das condições ambientais. Esse adesivo é recomendado para uso interno e externo, pois é também, resistente a água, solventes orgânicos e fungos, além de sua cura poder ser realizada em altas temperaturas ou a temperatura ambiente.

Todavia, as resinas que têm o componente básico de uréia-formaldeído são apenas indicadas para uso interno devido à sua pouca resistência à umidade e colagem sob alta pressão, contudo, pode ser usada para a cura em altas temperaturas ou temperaturas ambiente, sendo a mais utilizada para a colagem de chapas e para a fabricação de compensados (PEIXOTO, 2008).

Portanto, os adesivos podem ser classificados por meio de sua origem, uso e condição de exposição, pois baseando-se nessas características pode-se escolher o adesivo mais adequado para o uso que se deseja aplicar ao material. O Quadro 07 exemplifica algumas dessas classificações e propõe as possíveis aplicações.

Quadro 07: Tipos de adesivos e seus usos.

Adesivo	Base	Uso	Condições de uso
Origem animal	Proteína de peixe, de cartilagem, de osso, de tendões	Carpintaria de móveis	Ambientes internos não agressivos
Sangue	Albumina de sangue	Compensados	Ambientes internos não agressivos
Caseína	Proteína do leite	Móveis compensados, estruturas	Ambientes internos não agressivos, boa resistência mecânica
Soja	Amido, farinha de soja	Compensados	Ambientes internos e externos, baixa resistência às intempéries
Tanino	Acácia, quebracho	Compensados, aglomerados	Ambientes internos e externos, baixa resistência às intempéries
Fenol-formaldeído	Resina termofixa, fenólica	Compensados, aglomerados	Exteriores, boa resistência mecânica
Uréia-formaldeído	Resina termofixa, fenólica	Compensados, aglomerados	Ambientes internos, boa resistência mecânica
Resorcinol-formaldeído; Fenol-resorcinol-formaldeído	Resina termofixa, fenólica, resorcínica	Compensados, estruturas, madeira laminada	Interiores, exteriores, boa resistência mecânica
Isocianato	Resina termofixa isocianeto, metano	Aglomerados	Interiores
Acetato de polivinil (PVA)	Resina termoplástica	Uso não estrutural	Interiores
Poliuretano	Resina termofixa	Uso estrutural	Interiores e exteriores, resistente ao intemperismo, boa resistência mecânica
Epóxi	Resina termofixa multicomponente.	Reparos estruturais	Exteriores e interiores úmidos, boa resistência mecânica

Fonte: JESUS *apud* RIVERO, 2003.

Visto então as propriedades fundamentais de cada tipo de adesivo, a escolha do componente adequado para o uso é fundamental para a produção e durabilidade do material que se pretende fabricar. Nesta pesquisa, as condições para a colagem das peças foram determinadas de acordo com o local de processamento da matéria prima e o local do laboratório em que serão ensaiados os

produtos finais e, portanto, foi usado o adesivo poliuretano que é indicado para usos estruturais em interiores e exteriores, com boa resistência mecânica e às intempéries.

#### 1.4.4. Processo de fabricação do *Plybamboo*

Dentre os diversos usos aplicados aos laminados colados de bambu, o que mais se aproxima desta pesquisa é o *plybamboo*, ou seja, o painel de compensado de bambu. Zhang (2001) ressalta que essa é uma categoria especial na grande variedade de painéis de bambu, pois sua principal característica de fabricação é a prensagem do material em altas temperaturas (*high-temperature softening and flattening*). Obtém-se, então, uma chapa bastante forte, com alta rigidez e resistência ao desgaste, enquanto que seu processo de fabricação é menos trabalhoso e consome menos adesivo. Assim, pode ser recomendado para inúmeros usos na construção civil.

O processo de fabricação desse tipo de painel de bambu envolve uma série de etapas que vão desde a coleta do material, seguido por etapas de fatiamento dos colmos e colagem das ripas, até a produção de sua forma final. De acordo com Zhang (2001) e Ganapathy (1999) a Figura 27 exemplifica essas etapas de processamento. O produto final desse processo são painéis de compensado de bambu com diversas espessuras e tamanhos. Em geral são colados com três camadas perpendiculares entre si, contudo podem ser constituídos de mais camadas do material, desde que as faces opostas estejam alinhadas com o mesmo sentido de fibras.

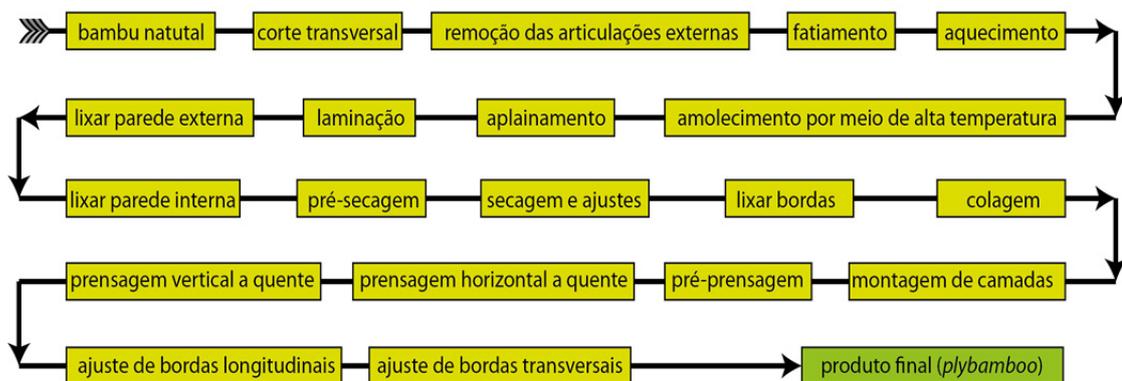


Figura 27: Cadeia produtiva do *plybamboo*.  
Fonte: Adaptado de ZHANG, 2001.

Algumas empresas, como a Oré Brasil, fabricam seus próprios painéis de compensado de bambu para os produtos finais que comercializam. Esses produtos foram desenvolvidos em países asiáticos, principalmente China, no qual esse mercado já encontra-se consolidado e essas chapas são aplicadas em diversos usos como caixas de transporte, fundos de caminhão, formas para a construção civil, mobiliário e muitos outros (GANAPATHY *et al*, 1999). As Figuras 28 e 29 exemplificam esse material.



Figura 28: *Plybamboo*.

Fonte: Catálogo de produtos da BCD Technology Co. Ltd.



Figura 29: *Plybamboo*.

Fonte: Catálogo de produtos da BCD Technology Co. Ltd.

Portanto, o processo industrial apresentado encontra-se estabelecido em países asiáticos e os produtos finais estão amplamente disponíveis nesses mercados. Todavia, no Brasil, essa produção ainda não é consolidada e o processo necessita de adaptações para ser produzido, ainda, de forma semi-artesanal e com o maquinário disponível no país. Assim, posteriormente será apresentado esse método de produção transposto para as condições de mão-de-obra e maquinário que existem no mercado brasileiro e que podem ser usados nesta pesquisa.

## **CAPÍTULO II – MATERIAIS E MÉTODOS**

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados as questões relativas à proposta de dispositivo de absorção sonora, as quais abrangem a espécie de bambu escolhida, o sistema absorvedor adequado ao material, o desenvolvimento e a caracterização do sistema de absorção. Nessa etapa os conceitos teóricos foram colocados em prática e questões relacionadas ao material, ao tipo de absorvedor, ao local de produção e ao local em que serão realizados os ensaios serão relacionados para a obtenção do melhor modelo a ser experimentado.

Em seguida serão descritos as etapas de execução do protótipo, passo a passo, para se obter a compreensão global do processo de produção envolvido, assim como as dificuldades e adequações que foram necessárias para a confecção do material, pois os protótipos foram executados em local que possui características climáticas distintas daquelas onde se localiza o laboratório onde foram feitos os ensaios.

Por fim, foram apresentados os procedimentos metodológicos necessários para a experimentação controlada dos protótipos, a norma utilizada, a caracterização do espaço e os dispositivos utilizados, dentre outros, assim como descreve-se os ensaios realizados com as medições de tempo de reverberação encontradas e a análise dos resultados obtidos.

### 2.1. A proposta de sistema de absorção sonora em BaLC

Tendo em vista os conceitos relacionados à acústica apresentados na revisão de literatura, Capítulo I, esta seção expõe as condicionantes que propiciam a aplicação do BaLC para o desenvolvimento de um sistema de absorção sonora tipo membrana ressonante. Serão apresentadas as principais características relativas à espécie de bambu selecionada, ao tipo de sistema absorvedor que foi produzido com as características encontradas na matéria prima e, por fim, o desenvolvimento e caracterização do dispositivo proposto.

#### 2.1.1. A espécie de bambu utilizada

Dentre as espécies citadas anteriormente, a que demonstrou a maior versatilidade para a aplicação e inúmeros usos foi a *Dendrocalamus giganteus*, pois

pode-se obter laminas com espessuras variadas e características físicas com elevado potencial para construção civil, adequando-se ao método de fabricação do bambu laminado colado e também do *plybamboo*. Além de que a espécie pode ser encontrada na região do Distrito Federal e entorno, de modo que o acesso a essa matéria prima é facilitado e pode-se obter a quantidade necessária para a produção dos painéis em BaLC.

### 2.1.2. O sistema de absorção escolhido

Tendo em vista a escolha da espécie e as vantagens da aplicação do material, propõe-se o uso do bambu em sua forma de laminado colado contraplacado – semelhante a um compensado – para a confecção de painéis para um sistema tipo membrana ressonante, ou seja, absorvedor sonoro de baixas frequências. Esse sistema de absorção pode ser também denominado de painel vibrante, membrana vibrante e painel ressonante, de modo que todas as terminações aplicam-se ao mesmo dispositivo.

Esse dispositivo pode ser utilizado com a caixa de ar vazia, gerando um pico de absorção claro e acentuado ou sua caixa de ar pode ser preenchida com material absorvente tipo poroso ou fibroso, de modo a não entrar em contato com o painel para que possa vibrar livremente. Essa inserção acarretará em uma ampliação da gama de frequências que o material absorverá e, conseqüentemente, um pico de ressonância menos acentuado. Assim, nesta pesquisa são estimados o comportamento do sistema para as duas configurações.

A seguir serão apresentados o desenvolvimento e a caracterização da proposta de absorvedor tipo membrana ressonante, com a estimativa teórica do pico de ressonância, os modelos de protótipos para ensaio e observações sobre o possível comportamento do sistema.

### 2.1.3. Desenvolvimento e caracterização da proposta

Com base nas características encontradas no bambu laminado colado apresentadas anteriormente optou-se, então, pelo sistema absorvedor tipo membrana ressonante. Nesse sistema existem duas variáveis principais que são a espessura da caixa de ar do dispositivo e a densidade superficial do painel que

vibrará com as ondas incidentes e uma variável adicional que é a possibilidade de se preencher a camada de ar com material poroso ou fibroso, todavia não modifica a ressonância do dispositivo.

Outros aspectos também devem ser considerados na proposição do sistema como a disponibilidade de matéria prima, o local onde serão executados os protótipos e o local onde serão executados os ensaios. Dessa forma, obteve-se o apoio do Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília (CPAB/UnB) para a execução dos protótipos. A matéria prima foi fornecida pelo Centro, porém a disponibilidade desse insumo na região de Brasília depende de fornecedores autônomos e, portanto, a variação da espessura da membrana de bambu torna-se um entrave na produção. Para a execução dos ensaios, obteve-se apoio do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (LEAC/EAC/UFSM), assim, a facilidade de transporte e manipulação dispositivos de absorção sonora foram, também, pré-requisitos para o seu projeto.

Além disso, o protótipo deve ser adaptado para as condições de produção da Oficina de Bambu e Madeira do CPAB/UnB. Dessa forma, o maquinário utilizado pelo Centro para a fabricação do BaLC foi considerado para o desenvolvimento da proposta, como as dimensões do bambu para ser fatiado e as dimensões das ripas para serem processadas, dentre outros.

Outro ponto importante para o projeto foram as diferenças climáticas entre as regiões de produção de protótipo e execução de ensaios. Pois, de acordo com dados do INMET, em Brasília-DF tem-se um clima tropical com estações de seca e chuva bastante marcantes, e uma seca intensa que gera umidade relativa do ar muito baixa. Já a cidade de Santa Maria - RS possui um clima subtropical úmido com alta umidade relativa do ar. Dessa forma, o projeto deve levar em consideração essas diferenças, pois o bambu laminado colado sofrerá com a umidade local, a dilatação e contração do material e uma grande deformação da membrana pode prejudicar seu funcionamento.

Com base nas limitações analisadas e com o objetivo de um modelo experimental que proporcionasse o ensaio de diferentes frequências de ressonância

para o sistema, idealizou-se uma membrana constituída por um painel de BaLC em apenas uma espessura, devido ao fornecimento de matéria prima, e uma caixa de ar com espessura variável, para que fosse desmontada e remontada. As partes foram projetadas com 4 camadas de ar diferenciadas, uma membrana de fundo, que confinaria o ar no interior do dispositivo e um aro, ou moldura, de pressão móvel sobre a membrana de bambu, para tencionar a estrutura e fazer com que os componentes funcionem como um todo coeso. Assim, tem-se um sistema constituído de moldura de pressão, membrana de bambu, anéis intermediários desmontáveis e membrana de fundo.

A espessura da membrana de bambu foi dimensionada com base na largura e comprimento ideal produzida pela máquina de fatiamento de ripas e pela espessura mínima produzida pela máquina de nivelamento de ripas. Dessa forma, obtém-se uma ripa com cerca de 0,2cm de espessura, largura de 2,5cm e comprimento de 120cm. Ainda, para se evitar a deformação por umidade e dilatação das peças, foi dimensionada uma membrana de duas camadas de ripas, orientadas de forma perpendicular, com 105cm de comprimento por 105cm de largura e 0,4cm de espessura.

Os condicionantes acústicos também foram considerados, pois, segundo Bistafa (2006), é recomendado que a distância mínima dos apoios rígidos das bordas da membrana ressonante seja superior a 40cm, para possibilitar que a chapa trabalhe no seu primeiro modo de vibração.

Tendo a espessura da lâmina de bambu como uma constante, para se obter a variação de frequência de ressonância do sistema é necessário modificar a camada de ar confinada no interior do dispositivo. Para tanto, pode-se recorrer a estimativa de comportamento exemplificada por Bies e Hansen (2009) para definir as espessuras de cavidade ideais com base na densidade superficial constante do painel. Essa densidade, para o material cedido pelo CPAB/UnB, foi previamente calculada por Oliveira (2013) obtendo massa específica de  $0,715\text{g/cm}^3$  e resultando na densidade superficial de  $2,86\text{Kg/m}^2$  para os painéis, que é a massa específica multiplicada pela espessura do painel de forma a obter-se a densidade pela área de da superfície do painel.

A Figura 30 apresenta uma análise preliminar para dimensionamento da caixa de ar do sistema de absorção sonora, com base no método empírico para membranas ressonantes mencionado na revisão de literatura. Lembrando que esse método foi desenvolvido para a madeira compensada e será adaptado para o BaLC.

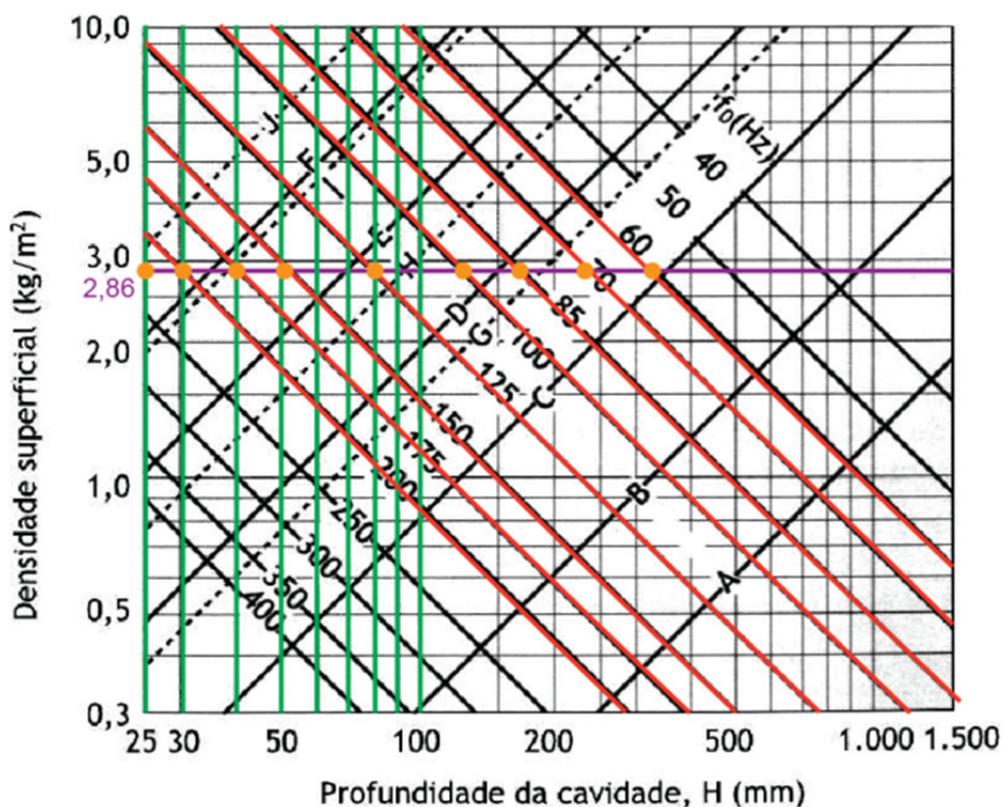


Figura 30: Gráfico paramétrico para dimensionamento de membrana ressonante. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN (2009).

Assim, tem-se na Figura 31 as correlações entre densidade superficial, profundidade da cavidade de ar, frequência de ressonância e a curva de coeficiente de absorção sonora. Com o valor de 2,86Kg/m<sup>2</sup> a linha na cor roxa representa a constante apresentada para do painel de bambu laminado colado, pois no projeto sua espessura é constante. As linhas verdes representam as espessuras de caixas de ar ideais para a confecção de anéis modulares removíveis e também uma dimensão adequada para manuseio e transporte; as linhas vermelhas representam as baixas frequências de ressonância que se deseja alcançar; e os pontos na cor laranja são as intersecções que correlacionam essas variáveis.

Observando-se o gráfico, as frequências de 100Hz, 85Hz, 70Hz e 60Hz necessitam de uma cavidade de ar muito espessa e, dessa forma, criar-se-ia um

protótipo com dificuldades de transporte e manuseio, gerando um grande volume e criando entraves na modulação do sistema. Entretanto, existe a possibilidade da cavidade de 100mm, pois sua frequência de ressonância ainda está próxima de 100Hz. Portanto, definiu-se essa cavidade como a espessura de ar máxima que irá compor o dispositivo de absorção sonora. Em 150Hz obteve-se uma espessura ideal da cavidade com 50mm, logo conferindo um segundo parâmetro de definição para o projeto do protótipo.

Contudo, devido a necessidade da criação de peças modulares que sejam adaptadas ao processo de produção, optou-se pela cavidade de 75mm, que está próxima da frequência de ressonância de 125Hz e, por fim, mantendo a modulação do sistema, uma cavidade final de 25mm que se aproximará da frequência de 200Hz. Portanto, definidas as cavidades de ar no interior do dispositivo, em 25, 50, 75 e 100mm, passa-se para o desenvolvimento do projeto dos elementos removíveis.

Os anéis removíveis foram projetados de forma a serem facilmente retirados e reposicionados. Assim, foram projetadas peças de 105cm de comprimento, 25mm de largura e 25mm de espessura. Essas peças juntas formam um quadro que apoia a membrana de bambu e se encaixam com o sistema macho-fêmea, para que sua ligação seja firme e impossibilite a passagem de ar da câmara interna para o meio externo, confinando a camada de ar em seu interior (Figura 32, p.78). Foi especificada a madeira popularmente conhecida como freijó (*Cordia goeldiana*) para a construção dos anéis, pois é uma madeira de densidade média aproximando-se da densidade do BaLC (MELO; CAMARGOS, 2011) além de estar amplamente disponível no mercado.

De acordo com dados LPF/SFB/MMA das Madeiras Comerciais do Brasil, a madeira popularmente conhecida como freijó (ou também claraíba, cordia-preta, frei-jorge, dentre outros) está no domínio fitogeográfico da Amazônia e pode ser encontrada nas regiões norte, centro-oeste e sudeste. Possui características físicas de moderadamente dura ao corte transversal manual, grã direita e textura média. Seus vasos são macroscopicamente visíveis e possuem diâmetro de médio a grande e distribuição difusa. Não está incluída nas espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção e, apesar de ser comumente encontrada no mercado, não

estava presente nas 100 espécies nativas mais comercializadas no Brasil em 2009. Sua principal característica, para esta pesquisa, é sua massa específica básica leve com valor menor que  $0,50\text{g/cm}^3$ .

Para o fundo do dispositivo foi proposto o uso de compensado de madeira também com espessura de 0,4cm, comprimento de 105cm e largura de 105cm, para a vedação completa do dispositivo. Os aros de pressão foram projetos em perfil L constituídos também em madeira freijó (*Cordia goeldiana*). Para que a pressão seja exercida sobre as peças foram inseridos parafusos com porcas tipo borboleta e arruela que podem ser facilmente desmontados a mão. Na figura 32 (p.78) pode-se observar um esquema do funcionamento das juntas projetadas para esse dispositivo.

O absorvedor completo, com suas dimensões e peças diferenciadas pode ser observado na Figura 32 (p.71) e 33 (p.72). Vale ressaltar que a área final de membrana é de  $1,0\text{m}^2$ , logo a membrana de bambu tem a dimensão de 100cm x 100cm livre para vibrar. Ainda, cada camada de ar interna do protótipo, segundo a estimativa feita pela Figura 31 (p. 68), proporcionará uma frequência de ressonância diferente, e, portanto, um pico de absorção sonora máximo em frequências distintas.

Os cálculos de pico de ressonância foram feitos com a densidade do bambu laminado colado do CPAB/UnB calculadas por Oliveira (2013), a qual utilizou em seus experimentos o mesmo lote de bambu que foi destinado à produção dos protótipos deste estudo. De modo que obteve-se a massa específica de  $0,715\text{g/cm}^3$  e a densidade superficial de  $2,86\text{Kg/m}^2$  nos painéis.

Assim, calculou-se, com base na Equação 08 (p. 29) apresentada anteriormente, as frequências de ressonâncias para cada uma das composições em que o protótipo será montado e estimou-se o comportamento sistema de acordo com Bies e Hansen (2009). Dessa forma, as camadas de 100, 75, 50 e 25mm, apresentaram uma frequência de ressonância de 112, 129, 158 e 224Hz respectivamente.

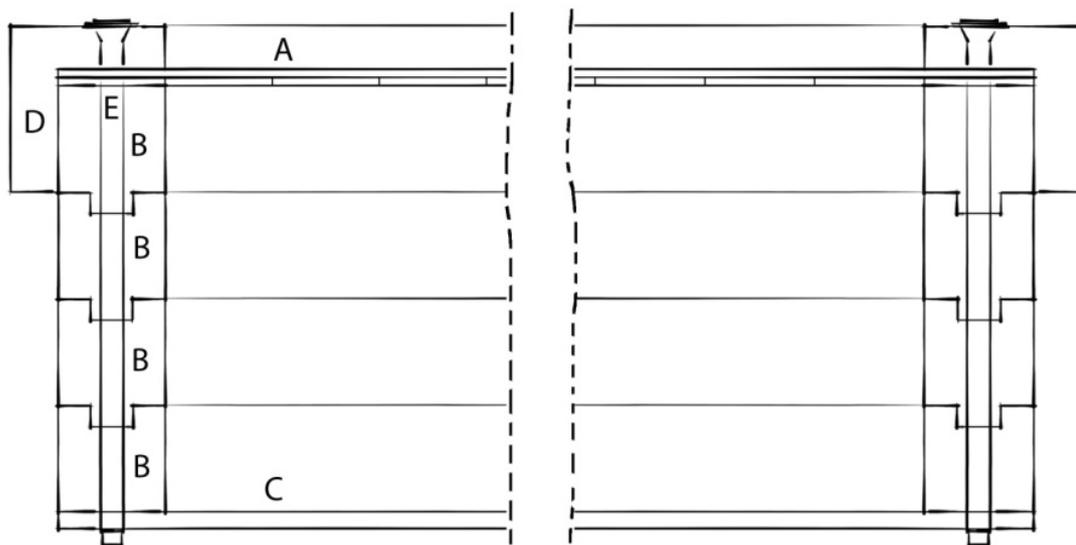


Figura 31: Corte esquemático do dispositivo absorvedor - A. Painel de bambu; B. Anéis removíveis; C. Painel de compensado de madeira; D. Aro de pressão. E. Parafuso com porca e arruela.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

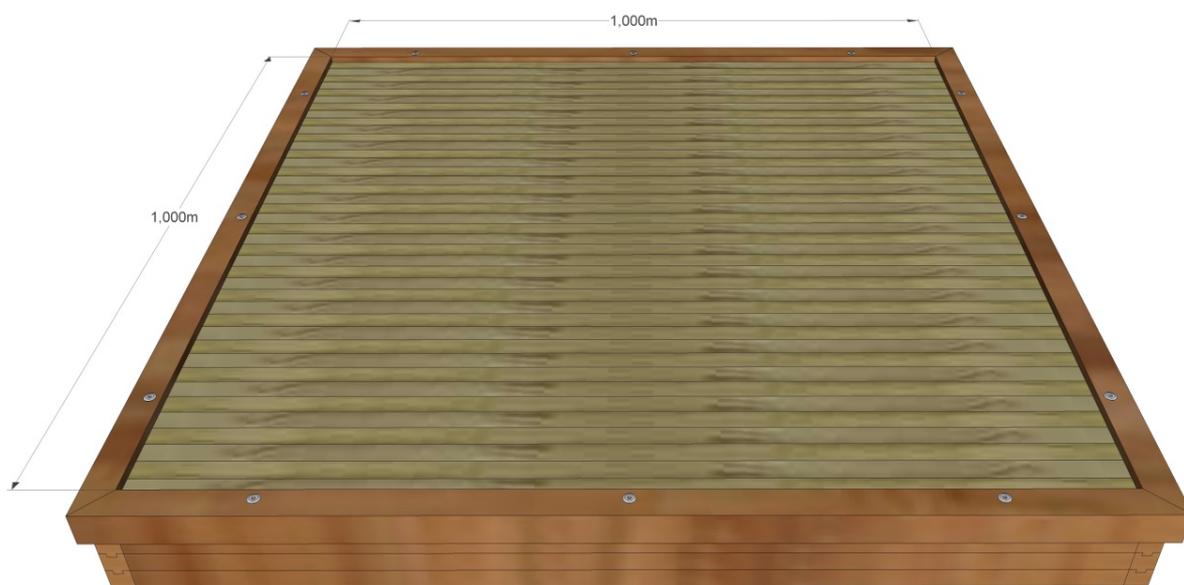


Figura 32: Perspectiva virtual do projeto de absorvedor acústico de baixa frequência.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

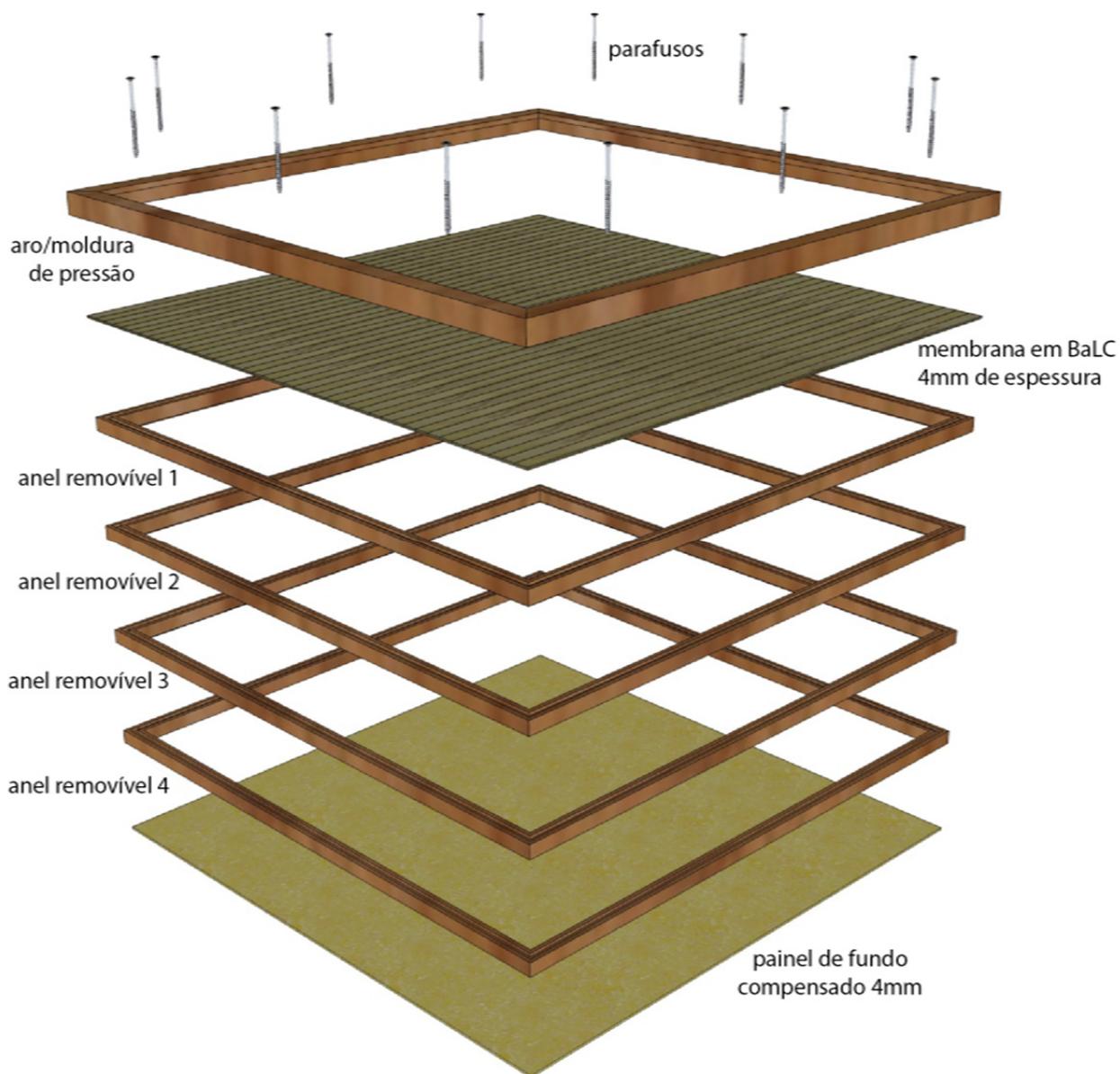


Figura 33: Perspectiva explodida dos elementos componentes do projeto separados em ordem de encaixe.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o controle dos experimentos e também da classificação de cada composição em que a camada de ar é alterada, mediante a montagem e desmontagem dos anéis removíveis, foi criada uma denominação específica com as seguintes abreviações:

1. BE100: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 100mm de espessura, vedada e vazia. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 112Hz;

2. BE075: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 75mm de espessura, vedada e vazia. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 129Hz;
3. BE050: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 50mm de espessura, vedada e vazia. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 158Hz.

Dessa forma, obteve-se 3 medições diferentes em que a câmara de ar no interior do dispositivo encontra-se vedada e vazia, logo esperava-se um pico de absorção acentuado na frequência de ressonância calculada. Contudo, com a possibilidade de inserção de material poroso ou fibroso no interior da caixa de ar, projetaram-se também as seguintes conformações com suas abreviações:

4. BEL100: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 100mm de espessura, vedada e preenchida com lã de vidro com espessura de 50mm. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 112Hz;
5. BEL075: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 75mm de espessura, vedada e preenchida com lã de vidro com espessura de 50mm. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 129Hz;
6. BEL050: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 50mm de espessura, vedada e preenchida com lã de vidro com espessura de 50mm. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 112Hz.

A inserção da lã de vidro deve manter o pico de ressonância do sistema, porém espera-se a ampliação da gama de frequências em que o absorvedor atuará e, portanto, uma curva menos acentuada e com maior abrangência das bandas frequências adjacentes à ressonância do dispositivo.

Ainda, duas outras conformações foram ensaiadas em laboratório. A primeira são as placas com a camada de ar de 25mm, contudo sem vedação

proporcionada pelo compensado de madeira. Nessa montagem as placas são colocadas sobre apenas um anel removível e posicionada diretamente na superfície do local de ensaio. E a segunda é o painel com sua face em contato com a superfície da câmara reverberante. O objetivo dessa conformação é o ensaio do bambu laminado colado como revestimento, pois as placas deixarão de funcionar como membrana ressonante, devido a falta de cavidade de ar significativa em entre a membrana e a superfície. Logo, obter-se-á apenas o coeficiente de absorção sonora do material. Espera-se que o material possua uma mínima absorção em frequências mais elevadas, devido a pouca porosidade que apresenta, e que esse material seja mais refletivo do que absorvedor. Assim, corroborando a premissa de que suas fibras unidirecionais e bastante resistentes promovem sua utilização acústica como membrana ressonante. Logo, obtém-se as seguintes abreviações das conformações:

7. BE025: Ensaio dos protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante em BaLC com a cavidade interna de ar de 75mm de espessura e vazia. Estima-se o pico de ressonância do sistema em 224Hz;
8. BE000: Ensaio da membrana em BaLC como revestimento e sem cavidade interna de ar. Não espera-se pico de ressonância nessa conformação, apenas um baixo coeficiente de absorção sonora em frequências mais elevadas.

O método empírico de dimensionamento do dispositivo tipo membrana ressonante utiliza dois gráficos para determinar as características do dispositivo de absorção sonora. Bistafa (2006) expõe que para a definição das propriedades acústicas dos painéis, a suas estimativa deve adotar o procedimento a seguir:

1. A Figura 34a (p. 75) representa o tipo de curva coeficiente de absorção sonora que pode-se obter pelos dados constantes na Figura 34b (p. 75). As curvas sólidas (da curva A até F) são aplicáveis para cavidades preenchidas com material absorvente (espessura de 10mm a 50mm); e as curvas tracejadas (da curva G até J) são aplicáveis para cavidades vazias;

2. Determina-se, então, a frequência fundamental de ressonância do painel ( $f_0$ ) para a absorção sonora máxima. Assim, associada a essa frequência, existe uma reta paramétrica na Figura 34b que intercepta as outras variáveis que se deseja estimar;
3. Na Figura 34b deve-se marcar o ponto de intersecção das retas que representam a profundidade da cavidade (H em mm), a densidade superficial do painel (em  $\text{Kg/m}^2$ ) e a frequência de ressonância do sistema. Esse ponto se aproximará da reta que representa a curva de absorção correspondente a Figura 34a e, assim, obtém-se uma estimativa do coeficiente de absorção sonora para o dimensionamento analisado em 34b.
4. O material absorvente inserido na cavidade não deve estar em contato com o painel e suportes da membrana devem estar separados em, no mínimo, 0,4m.

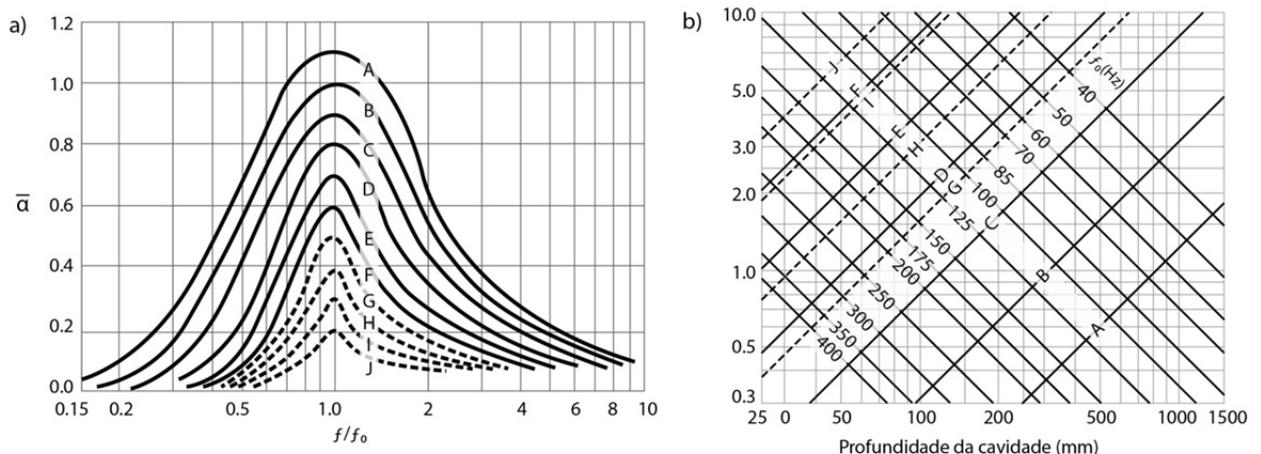


Figura 34: a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção sonora; b. Gráfico paramétrico de dimensionamento com cavidade, densidade superficial e frequência de ressonância;  
 Fonte: Adaptado BIES e HANSEN, 2009.

Com base no método previamente apresentado e tendo em vista que a produção do painel em laminado colado e sua densidade superficial como fatores determinantes, assim como a espessura da caixa de ar e sua frequência de ressonância, os dados obtidos no pré-dimensionamento foram aplicados aos gráficos para se determinar a previsão do coeficiente de absorção sonora das diversas conformações apresentadas. Os dados podem ser encontrados nos gráficos das Figuras 35 a 38.

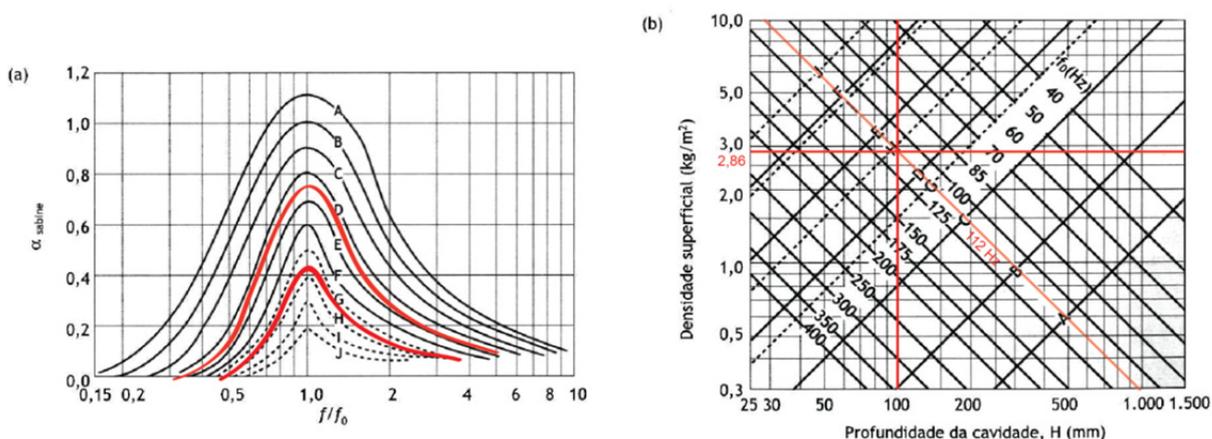


Figura 35: a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE100 e BEL100.  
Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Os gráficos da Figura 35 demonstram os dimensionamentos do protótipo na conformação BE100 e BEL100. Em ambos tem-se o mesmo pico de ressonância, em 112Hz, contudo a previsão do coeficiente de absorção acústica é distinta. Como pode ser observado no gráfico paramétrico, em 35b, o ponto de intersecção das retas aproxima-se da diagonal pontilhada que corresponde à curva de absorção H para a cavidade interna vazia próxima, com um coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) por volta de 0,4. Quando se insere o material poroso no interior da câmara de ar, seu coeficiente de absorção sonora aproxima-se da curva E, apontando um valor entre 0,6 e 0,8. Ambas as curvas estão representadas em 35a.

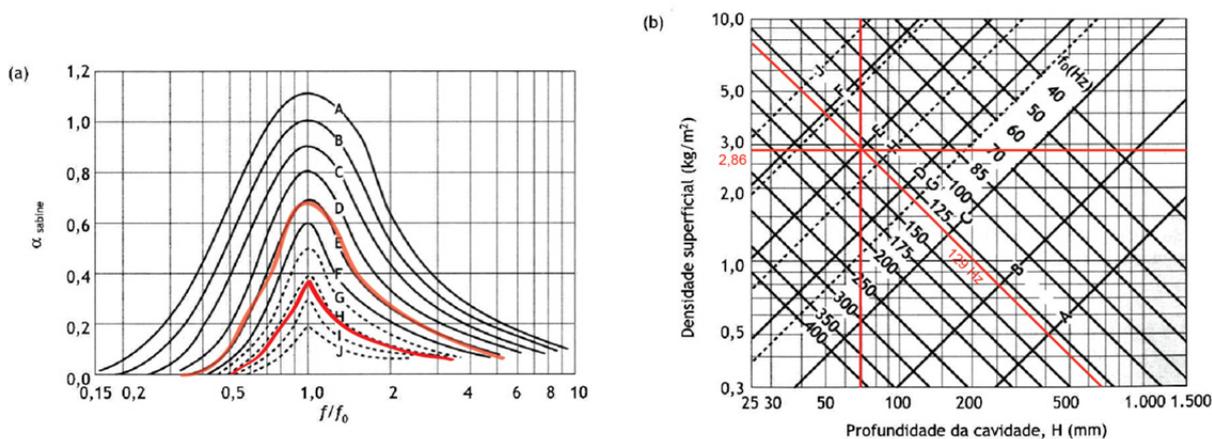


Figura 36: a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE075 e BEL075.  
Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Nos gráficos da Figura 36 estão representados os dimensionamentos para os absorvedores modelo BE075 e BEL075. Com o pico de ressonância inalterado nos dois modelos, apenas suas curvas de absorção são distintas. Em 36b

está o gráfico paramétrico para a determinação da curva de absorção do dispositivo. Observa-se que para a cavidade interna vazia, o gráfico 36a aponta uma curva próxima a H, com coeficiente de absorção por volta de 0,4. Com a inserção da lã em seu interior, o dimensionamento determina a curva E para a absorção do dispositivo, com valor entre 0,6 e 0,8.

Vale lembrar que esse método de determinação do coeficiente de absorção sonora foi desenvolvido para ser aplicado no compensado de madeira. Logo, todos os estudos executados para se chegar ao gráfico paramétrico e sua relação com as curvas de absorção tem por base um material semelhante ao bambu, mas com características físico-químicas diferenciadas. Logo, os resultados dos ensaios podem apresentar diferenças quanto à previsão teórica, pois o método está sendo adaptado para o uso do material proposto.

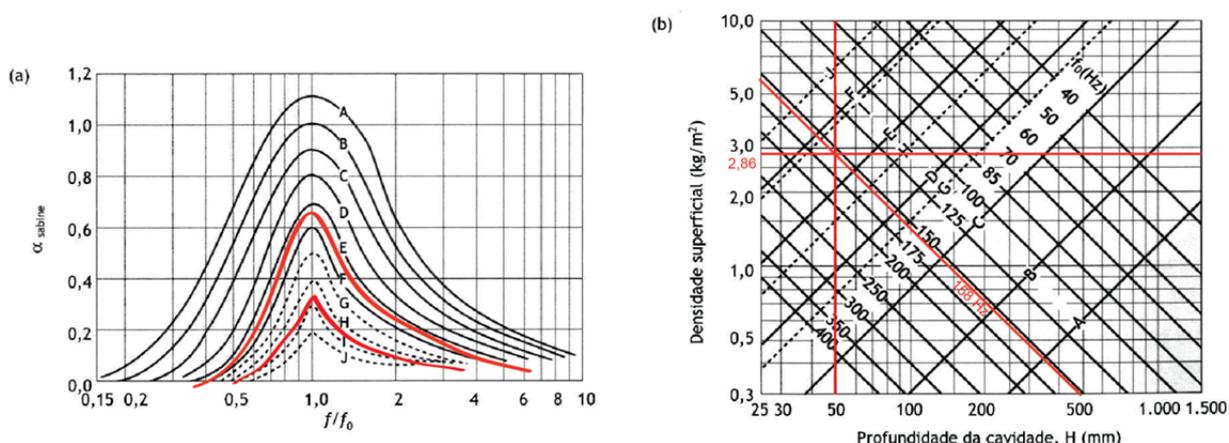


Figura 37: a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE050 e BEL050. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Já os gráficos da Figura 37 mostram a previsão de coeficiente de absorção acústica para a montagem BE050 e BEL050 do dispositivo tipo membrana ressonante. O pico de ressonância do sistema mantém-se constante, ou seja, frequência de ressonância em 158Hz, e assim como nos outros modelos, as curvas de curvas de coeficiente de absorção são diferentes. Dessa forma, para o modelo BE050 obteve-se uma curva de absorção próxima a curva I com um valor abaixo de 0,4 e o modelo BEL050 obteve um valor acima de 0,6 de absorção localizado entre a curva E e F.

Por fim, os gráficos da Figura 39 (p. 78) apresentam a previsão do coeficiente de absorção sonora para o modelo BE025. Nesse modelo não foi

inserido o material fobroso em seu interior, pois a camada de ar remanescente é inferior a espessura da lã utilizada dos modelos anteriormente descritos. Com a frequência de ressonância em 224Hz e a intersecção dos pontos na figura 40b, obteve-se uma curva de absorção sonora entre as curvas I e J, com valores pouco acima de 0,2.

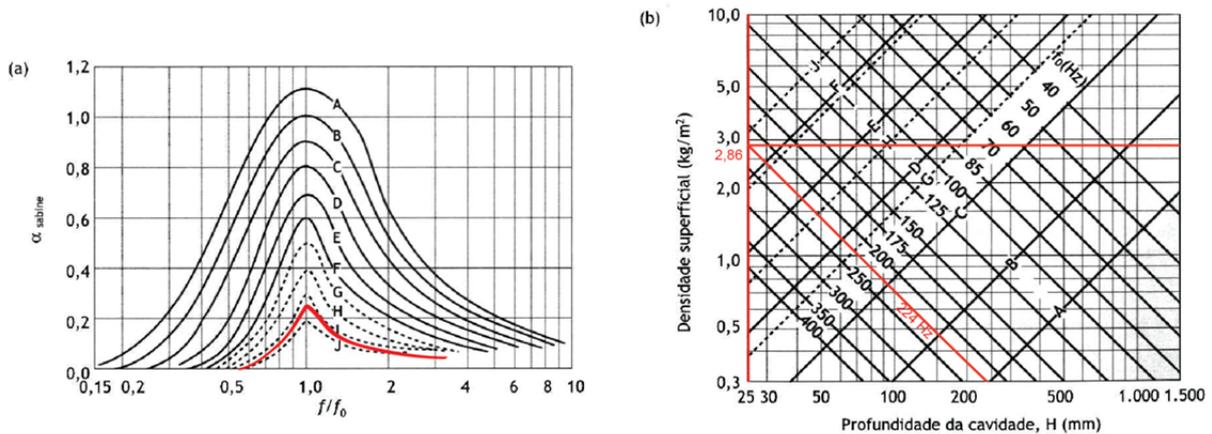


Figura 38: a. Curvas de previsão de coeficiente de absorção acústica; b. gráfico paramétrico de dimensionamento; Ambos para BE025.  
Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Com os modelos e estabelecidos, os dimensionamentos executados e a previsão de absorção sonora exemplificada nos gráficos anteriores, a Tabela 01 resume os dados apresentados para cada um dos ensaios que foram realizados. Esses dados foram confrontados com os ensaios em laboratório e, dessa forma, pode-se avaliar a aplicabilidade do método desenvolvido para os compensados em madeira aos painéis de bambu laminado colado. Lembrando que as fibras de madeira e bambu possuem algumas diferenças em sua composição e resistência, de modo que os resultados obtidos em laboratório tendem a ressaltar também essas peculiaridades.

Tabela 01: Resumo dos modelos de absorvedor tipo membrana ressonante e a previsão de suas características acústicas de acordo com o pré-dimensionamento.

Modelo	Câmara interna	Frequência de Ressonância (Hz)	Coefficiente de Absorção Acústica (Sabines)
BE100	Vazia	112	Entre 0,4 e 0,6
BE075	Vazia	129	Próximo a 0,4
BE050	Vazia	158	Entre 0,2 e 0,4
BE025	Vazia	224	Entre 0,2 e 0,4
BE000	-	-	-
BEL100	Lã de Vidro 50mm	112	Entre 0,6 e 0,8
BEL075	Lã de Vidro 50mm	129	Entre 0,6 e 0,8
BEL050	Lã de Vidro 50mm	158	Próximo a 0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem outras formas de previsão do coeficiente de absorção sonora e das características do dispositivo tipo membrana ressonante, contudo, esses cálculos envolvem outras propriedades do material, as quais não estão amplamente disponíveis na literatura que trata dos painéis em bambu laminado colado, logo não serão abordadas. Ainda, esta pesquisa sobre comportamento do BaLC com relação às vibrações acústicas parece ser uma pesquisa não usual no país e, por conseguinte, a previsão do coeficiente de absorção do sistema com o método empírico pode ser satisfatória. Esta pesquisa parte de um ponto inicial sobre os estudos acústicos desse material e aborda de uma previsão baseada em ensaios de campo, ou seja, aproxima-se do comportamento real do protótipo que será ensaiado em câmara reverberante.

#### 2.1.4. A lã de vidro

Nesta pesquisa, a lã de vidro foi introduzida apenas com o propósito de avaliar o comportamento do dispositivo de absorção acústica projetado. Contudo, a lã proporciona algumas desvantagens, pois necessita de equipamentos de proteção individual para ser manipulada, pode causar irritações na pele, nos olhos e no sistema respiratório, além de questões ambientais relacionadas, apesar de ainda ser um eficiente isolante térmico e acústico bastante utilizado na construção civil. Assim, não é foco desta pesquisa as questões relacionadas a esse material, apenas serão apresentados os dados relativos à lã especificada para compor o absorvedor tipo membrana ressonante.

Para a especificação da lã observou-se apenas as dimensões da camada de ar e a disponibilidade de fabricantes com a iniciativa de testar o funcionamento de seu produto no absorvedor de baixas frequências proposto. Assim, por meio de outra pesquisa em andamento no Laboratório de Acústica da EAC/UFSM obteve-se a lã AISLHOGAR de 51mm do fabricante Owens Corning. Esse material é destinado ao isolamento termoacústico e fabricado com fibra de vidro de baixa densidade, aglutinada com resina fenólica de forjado térmico, sendo apresentado em rolos de cor rosa e sem recobrimento. O fabricante recomenda o uso como isolamento térmico e acústico no ramo da construção, como no interior de paredes e muros divisórios, sobre forros e como absorvente de sons sob alguns tipos de piso e no interior de sistemas feitos com painéis de gesso (OWENS CORNING, 2011).

De acordo com a Owens Corning (2011), a lã de vidro fabricada segue diversas normas para a garantia de sua qualidade como material térmico e acústico e possui os coeficientes de absorção sonora presentes no Quadro 08.

Quadro 08: Coeficientes de absorção acústica da lã de vidro AISLHOGAR.

Espessura		Bandas de Oitava (Hz)						
mm	polegada	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
51	1,5	0,22	0,60	0,91	0,93	0,91	0,95	0,85

Fonte: Owens Corning, 2011.

Para finalizar, então, a etapa de proposta de absorvedor acústico em BaLC, a caracterização da lã de vidro também foi feita em laboratório e uma última denominação de modelo a ser ensaiado foi acrescida aos modelos anteriormente expostos. Assim, denominou-se de LAV050, o experimento que obteve os coeficientes de absorção sonora para esse material em câmara reverberante, e, portanto, tratou-se apenas de um fator de comparação de resultados obtidos com aqueles expostos pelo fabricante, de modo a garantir a qualidade do produto fornecido.

## 2.2. Execução do protótipo

Após a exposição das variáveis que influenciaram o projeto do protótipo e a confecção de um projeto executivo, passa-se, então para a etapa de execução do protótipo. Esta etapa subdivide-se em partes que abrangem o fatiamento dos colmos de bambu, a produção das ripas, a secagem e imunização das ripas, a colagem desse material e, por fim, a montagem do protótipo. Esse processo de produção foi desenvolvido no Centro para realizar suas pesquisas relacionadas com o BaLC e, portanto, é uma adaptação de diversos outros processos existentes para a região do Distrito Federal.

A equipe multidisciplinar do CPAB/UnB, a qual também fez parte o autor desta pesquisa, desenvolveu o processo de produção utilizado na Oficina de Marcenaria em Bambu e Madeira e de acordo com Santos (2013) o método desenvolvido abrange as etapas exemplificadas na Figura 39 (p. 81).



Figura 39: Fluxograma das etapas de produção do BaLC do CPAB/UnB.  
Fonte: Adaptado de SANTOS, 2013.

Logo, com a exemplificação proporcionada pelo fluxograma apresentado, tem-se o processo completo para a produção do laminado colado de bambu pelo CPAB/UnB. Para esta pesquisa, o material cedido encontrava-se já quantificado e caracterizado no estoque de matéria-prima do Centro, logo as etapas de coleta, transporte e estocagem, triagem, profilaxia inicial, quantificação, caracterização e corte dos colmos não serão descritas em detalhes

### 2.2.1. Local de confecção do BaLC

Os protótipos foram confeccionados na Oficina do CPAB/UnB. Localizada no bairro Granja do Torno, Região Administrativa I do Distrito Federal, a Oficina possui infraestrutura, com um galpão de aproximadamente 650m<sup>2</sup> dedicado à pesquisa de materiais não convencionais para aplicação em arquitetura e *design*, dentre outros. Possui maquinário para marcenaria em madeira e também maquinário especializado para a produção do bambu, como a fatiadora de colmos em ripas brutas, a taquari para nivelamento e desengrosso da superfície das ripas, as prensas especialmente projetadas para a colagem lateral das ripas e, também, as prensas especializadas para a colagem vertical das pranchas de BaLC produzidas.

Ainda, conta com uma equipe de marcenaria e apoio especializado no processo de produção supracitado. Assim, a essa oficina conferiu apoio fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa, pois foram necessários 12m<sup>2</sup> de protótipos, ou seja, 12 peças com as dimensões e características especificadas anteriormente, para que suas propriedades acústicas pudessem ser experimentadas no Laboratório de Acústica da EAC/UFSM.

Além de fornecer o material necessário para execução dos protótipos, como os colmos de bambu espécie *Dendrocalamus giganteus*, colhidos na região do entorno do Distrito Federal, e a madeira freijó (*Cordia goeldiana*) que tem densidade de aproximadamente 0,50g/cm<sup>3</sup>. Os colmos de bambu foram fornecidos para a Universidade por empreendedores individuais que fazer a coleta em fazendas e chácaras nas proximidades do Distrito Federal, a profilaxia em loco e o transporte para a Oficina. A madeira utilizada foi adquirida pela UnB por meio de concorrência e foi fornecida pelo comércio da região. A Figura 40 e 41 (p. 83) pode-se observar a infraestrutura do local de produção.



Figura 40: Oficina de Marcenaria em Bambu e Madeira do CPAB/UnB.  
Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Jaime Almeida.



Figura 41: Estoque de bambu para a produção do BaLC da Oficina do CPAB/UnB.  
Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.

### 2.2.2. Fatiamento do bambu

O início da etapa de fatiamento das ripas ocorre após o corte dos colmos em peças com comprimento por volta de 125cm. A máquina fatiadora realiza um corte duplo, com o uso simultâneo de dois discos de serra, na parede do bambu. Logo, produz ripas brutas do material que ainda estão unidas pelos diafragmas da peça.

Nessa fase do processamento é importante atentar para o corte dos colmos, os quais devem possuir nós nas duas extremidades, de forma a evitar perda de material causada pela trepidação da máquina, e para a espessura da parede do bambu, pois peças da base do colmo podem ter espessura de parede maior do que a regulagem geral da máquina, necessitando de ajustes constantes para o processamento do material. Para tanto, deve se fazer uma triagem das peças com espessuras semelhantes de parede do colmo e, assim, executar uma regulagem para cada lote a ser fatiado. A máquina e o corte executado podem ser observados nas Figuras 42 e 43 (p. 84).



Figura 42: Máquina fatiadora de ripas.  
Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.



Figura 43: Bambu cortado pela máquina fatiadora.  
Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.

### 2.2.3. Ripamento do bambu

Em seguida, o material processado na etapa anterior é separado dos diafragmas dos nós do bambu, para se obter as ripas brutas soltas, e encaminhado para outra máquina especializada denominada taquari. Esse maquinário produz as ripas com a altura e largura especificadas em projeto e retira completamente a casca do bambu. Assim, obtém-se uma ripa uniforme para ser encaminhada à imunização, secagem e principalmente para a aplicação do adesivo, pois como visto anteriormente, a composição lisa e resistente a casca do bambu possui pouca aderência à adesivos, logo deve-se expor as fibras logo abaixo da casca para alcançar uma colagem eficiente. A Figura 44 exemplifica a máquina taquari.



Figura 44: Máquina taquari para nivelamento de ripas de bambu.  
Fonte: Arquivo CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.

O processo de ripamento que a máquina executa utiliza varias fresas simultaneamente para gerar um produto acabado. Assim, são aplainadas a espessura e a largura simultaneamente, de modo que cada ripa inserida no sistema tenha a mesma dimensão de regulagem. Nas Figuras 45 e 46 podem ser observados o processo pelo qual a ripa é aplainada na taquari, com o sentido em que é inserida e as fresas que fazem o aplainamento em duas dimensões e também os resíduos gerados por essa máquina. Esses resíduos são peneirados para a separação dos diferentes tamanhos de grãos e estocados para uma possível reutilização.

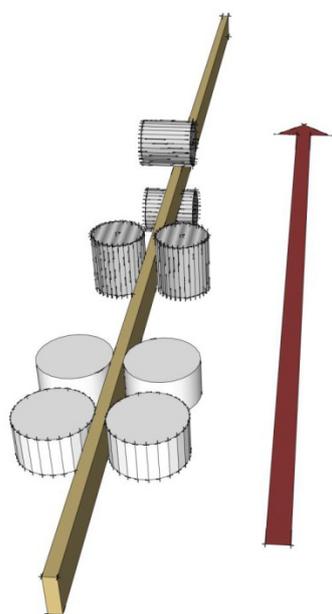


Figura 45: Esquema de lâminas.  
Fonte: SANTOS, 2013.



Figura 46: Resíduos da máquina taquari.  
Fonte: Foto de Ana Cristina Magalhães.

#### 2.2.4. Secagem das ripas

Devido ao caráter experimental dos protótipos que seriam produzidos, aos quais não exigem durabilidade dos produtos, a sua utilização no interior de laboratório e, também, à disponibilidade do produto químico para tratar as peças selecionadas para a confecção do dispositivo de absorção acústico, as ripas destinadas à execução do projeto apenas passaram pelo processo de secagem e não foram tratadas quimicamente. Logo, a etapa de imunização do material não foi aplicada nas membranas utilizadas para o sistema absorvedor proposto.

Assim, as peças passaram do processo de ripamento diretamente para a secagem. Para esta etapa, o material é colocado em gabinetes com uma disposição que favoreça a ventilação entre as peças e devem ser armazenados em local sombreado e distante do solo. De acordo com a época do ano e das condições climáticas de Brasília, esse material permanecerá em secagem por um período de 30 a 45 dias. Após esse período o teor de umidade das peças deve ser medido para conferir se o material está pronto para a colagem, pois em geral, os adesivos especificam um teor de umidade abaixo de 16% para uma aplicação confiável. Na Figura 47 pode ser observado o gabinete no qual as peças foram colocadas para secar ao ar livre.



Figura 47: Ripas em secagem no CPAB/UnB.  
Fonte: Foto do autor.

#### 2.2.5. Ensaio de teor de umidade

Para a determinação precisa do teor de umidade das peças ao fim do período de secagem, obteve-se apoio do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro LPF/SFB/MMA para a realização do ensaio de umidade das ripas. Para tanto, utilizou-se as diretrizes da norma ABNT NBR 7190/1997: Projeto de Estrutura de Madeira, contudo foi necessária a adaptação das dimensões dos corpos de prova para as características dimensionais das peças de bambu.

De acordo com a norma, o teor de umidade da madeira, no caso desta pesquisa o bambu, corresponde à relação entre a massa de água nela contida e a massa de madeira seca dada por:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$$

(Equação 10)

Onde:

$m_i$  é a massa inicial do bambu, em gramas;

$m_s$  é a massa do bambu seco (0% umidade), em gramas.

Os corpos de prova utilizados foram adaptados para a dimensão da ripa, de modo que foram produzidos 12 corpos de prova com as dimensões finais da ripa, que seria utilizada na confecção dos painéis, de 350mm de comprimento, 25mm de largura e 02mm de espessura.

Os procedimentos para determinação presentes na norma foram seguidos. Foi determinada a massa inicial com a exatidão de 0,01g. Após esse procedimento os corpos de prova foram inseridos na câmara de secagem e a temperatura foi gradativamente elevada para o máximo de 103°C ±2°C. Na secagem completa do material as medições de controle foram feitas durante alguns dias até que a variação entre as medidas consecutivas foi menor que 0,05% como estipulado na norma. Os resultados são apresentados na Tabela 02 (p. 88).



Figura 48: Espessura final da lamina de bambu.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 49: Balança de precisão usada.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 50: Corpos de prova em secagem na estufa.  
Fonte: Foto do Autor.



Figura 51: Temperatura de secagem da estufa.  
Fonte: Foto do Autor.

Tabela 02: Ensaio de teor de umidade das ripas de bambu.

Ensaio de Umidade das Ripas de Bambu ( <i>Dendrocalamus giganteus</i> )				
Amostra	Dimensões (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	TU(%)
01	350x25x02	13,77	12,34	11,59
02		14,25	12,7	12,20
03		12,83	11,46	11,95
04		9,4	8,31	13,12
05		10,19	9,03	12,85
06		14,05	12,55	11,95
07		12,35	11	12,27
08		12,69	11,31	12,20
09		11,27	10,03	12,36
10		11,15	9,89	12,74
11		11,27	10,01	12,59
12		10,11	8,98	12,58
Médias	-	11,94	10,63	<b>12,37</b>
Coefficiente de Variação (CV)	-	-	-	<b>3,48%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, com a apresentação dos dados pode-se concluir que o teor de umidade das ripas já se encontra em equilíbrio com o valor de TU=12,37% e coeficiente de variação (CV) de 3,48%. As amostras variaram de 11,59% a 13,59%. Assim, o processo de colagem horizontal e vertical pode ser iniciado, pois as ripas estão em condições ideais para a aplicação do adesivo.

## 2.2.6. Colagem das ripas finalizadas

Esta etapa para a confecção dos protótipos envolve os processos de colagem das ripas e prensagem horizontal e a colagem com prensagem vertical. Assim, com a obtenção do teor de umidade ideal, por volta de 12%, inicia-se o processo de prensagem horizontal desse material, sendo o produto final uma prancha de bambu laminado colado com a espessura de 0,2cm, largura e comprimento de aproximadamente 30cm x 120cm, respectivamente. Para tanto, é utilizado outro maquinário especializado para prensagem das ripas lado a lado. Nessa máquina a prensagem ocorre a temperatura ambiente, de modo que são posicionadas lateralmente 12 ripas com a aplicação do adesivo em suas bordas, podem ser feitas várias pranchas simultaneamente, entretanto, deve-se separar cada camada com um material não aderente ao adesivo. Em seguida aplica-se a pressão desejada durante o tempo necessário. A prensa e o esquema de colagem e prensagem do material podem ser observados nas Figuras 52 e 53 (p. 90).

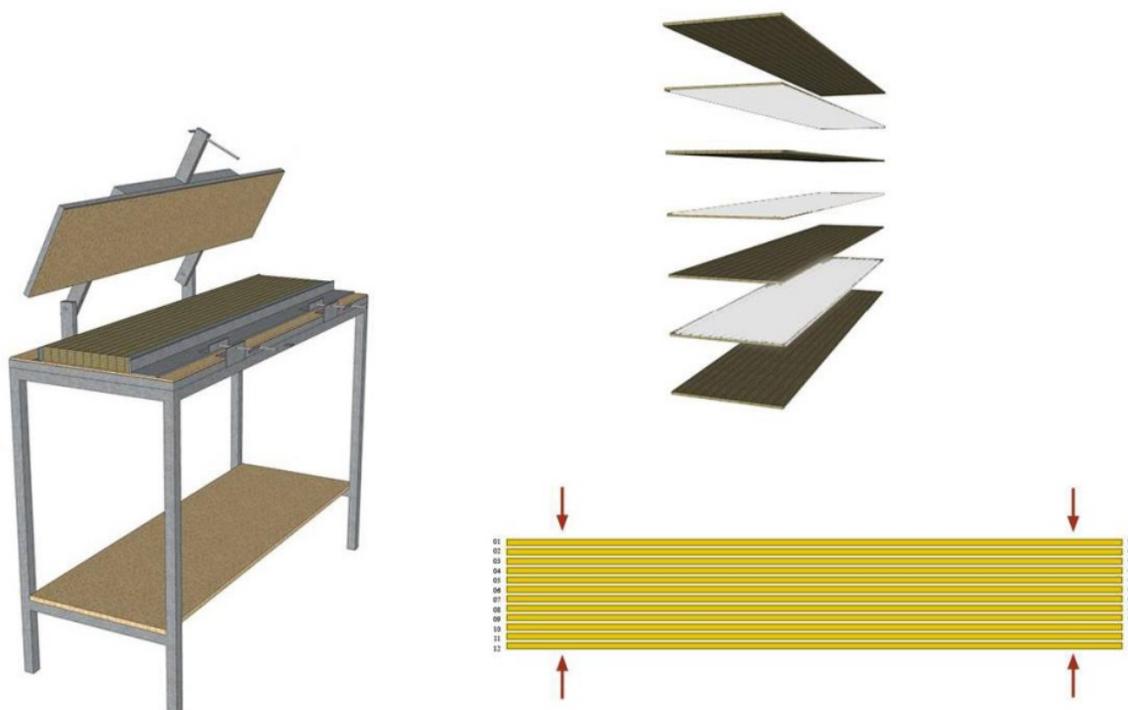


Figura 52: Esquema de colagem e prensagem horizontais. As setas vermelhas indicam a direção de colagem das ripas em vista superior.  
Fonte: Arquivo do CPAB, 2011.



Figura 53: Prensa horizontal do CPAB/UnB.  
Fonte: Arquivo do CPAB/UnB, foto de Randal Andrade.

Para a colagem das peças foi utilizado o adesivo estrutural Cascola PU Monocomponente, a base de poliuretano, com rendimento entre 150 e 200g/m<sup>2</sup> (ver especificações do adesivo no anexo XI, p. 148) A escolha do adesivo teve como condicionante as intempéries climáticas as quais o painel de bambu sofreria, como as mudanças de temperatura e umidade entre os locais de fabricação e experimentação do protótipo; o transporte, pois o material seria enviado para uma distancia de mais de 2000km e, portanto, poderia sofrer danos relativos a essa manipulação do dispositivo; e, por fim, a disponibilidade, pois é o adesivo principal utilizado nas pesquisas do CPAB/UnB.



Figura 54: Adesivo utilizado para a colagem das ripas de bambu.  
Fonte: Foto do autor.

Na prensagem, cada camada de ripas foi separada com uma placa de fórmica e a pressão foi aplicada durante o período de 03 horas. Em seguida, as

chapas foram retiradas da prensa e ficaram em repouso por 24 horas para finalizar a cura do adesivo. Após essa etapa de colagem, o excesso de adesivo foi removido das pranchas por meio de uma esmerilhadeira manual, para que a superfície esteja pronta para a etapa seguinte.

Com as pranchas produzidas, inicia-se a etapa de colagem vertical que produzirá o painel de bambu. Para a prensagem com as dimensões exigidas para o painel, com mais de 1m de comprimento e largura, a processo necessitou ser feito de modo artesanal, pois não havia prensa disponível para tal dimensão. Assim, as pranchas foram posicionadas sob uma superfície lisa lado a lado com a aplicação do adesivo em sua parte superior e outra camada de pranchas foi posicionada de forma perpendicular sobre a primeira. Por fim, aplicou-se uma pressão uniforme sobre essas pranchas durante um período de 03 horas e depois foram retiradas para permanecerem em repouso por mais 24 horas, para finalizar a cura do adesivo. Desse modo o produto final desse processo é um painel de bambu laminado colado com duas camadas perpendiculares entre si e espessura final de 4mm. Esse placa pode ser observada na Figura 55, a qual ainda está com o excesso de cola. A etapa seguinte irá remover esse excedente e fazer a montagem e acabamento do protótipo.



Figura 55: Painéis de bambu laminado colado sem acabamento.  
Fonte: Foto do autor.

### 2.2.7. Montagem do protótipo

As peças projetadas em madeira foram produzidas simultaneamente ao processo de produção do painel de bambu. Utilizou-se as técnicas tradicionais de marcenaria para a confecção dos anéis removíveis e também do painel de fundo. Ao final da produção do BaLC, todas as peças já estavam finalizadas, restando apenas a montagem dos protótipos. Foram utilizados os parafusos tipo cabeça redonda com fenda de 14cm de comprimento, porcas tipo borboleta e arruelas, dessa forma, gerando a pressão necessária para que o dispositivo permanecesse unido e sua membrana tensionada pelos aros do dispositivo. Essas peças podem ser observadas nas Figuras 56 a 59.



Figura 56: Sistema de encaixe tipo macho-fêmea.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 57: Peças para a montagem do protótipo.  
Fonte: Foto do autor.

Os excedentes de cola presentes na membrana de BaLC foram removidos com auxílio da esmerilhadeira manual, pois a cola exige um alta rotação de atrito da lixa para ser retirada com eficiência e rapidez, e os protótipos foram então montados de acordo com as especificações do projeto. Nessa fase também foram retiradas 03 amostras de cada painel para fazer o ensaio de densidade final dessas membranas e espera-se pouca diferença entre os valores obtidos por Oliveira (2013). Depois de cortado nas dimensões adequadas, seguiram para a fase de acabamento em que foi aplicada a seladora para madeira comum, fabricante Sayerlack, em todos os componentes, para diminuir a absorção de umidade pelos materiais e obter uma qualidade satisfatória de acabamento.



Figura 58: Montagem dos painéis.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 59: Protótipo montado sem acabamento final.  
Fonte: Foto do autor.

Os produtos finais desse processo foram 12 protótipos de absorvedores acústicos tipo membrana ressonante como o especificado em projeto. Tal quantidade foi produzida devido as recomendações de área de absorvedor para o ensaio em câmara reverberante, segundo a ISO 354:2007 – *Measurement of sound absorption in a reverberation room* – para a obtenção do comportamento acústico desse material. As figuras 60 a 62 demonstram uma unidade do material confeccionado para a análise.



Figura 60: Protótipo do dispositivo de tipo membrana ressonante finalizado.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 61: Protótipo com a demonstração dos anéis removíveis e a membrana em BaLC.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 62: Membrana de BaLC do topo e placa de compensado de madeira do fundo.  
Fonte: Foto do autor.

### 2.2.8. Ensaio de densidade aparente do BaLC

Para confirmar a densidade aparente do painel de bambu laminado colado produzido pelo CPAB/UnB, obteve-se apoio do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro – LPF/SFB/MMA – e seguiu-se a norma ABNT NBR 7190/1997: Projeto de Estrutura de Madeira. Logo, com o ensaio dessa massa específica convencional poder-se-á ter uma comparação com os valores obtidos por Oliveira (2013), dentre outros. Ainda, segundo a norma, o teor de umidade de 12% é considerado ideal para a realização de testes físico-mecânicos em madeiras. Contudo, algumas características do teste necessitaram de adaptações, pois o material apresenta semelhanças e, também, diferenças em relação à madeira e as amostras foram retiradas de cada painel destinado aos ensaios acústicos.

Dessa forma, foram extraídas 36 amostras dos painéis e climatizadas em ambiente controlado, na câmara de climatização do LPF/SFB/MMA, até o estabelecimento de umidade de equilíbrio em 12%. Vale ressaltar que essa foi a umidade obtida para as ripas antes da confecção dos painéis, e, portanto, nas condições ambientes, no momento da fabricação, já encontravam-se com características adequadas esse ensaio.

Segundo a NBR 7190/1997, a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, sendo dada por:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}}$$

(Equação 11)

onde:

$m_{12}$  é a massa do bambu a 12% de umidade, em quilogramas;

$V_{12}$  é o volume do bambu a 12% de umidade, em metros cúbicos.

Os procedimentos para determinação da massa do corpo de prova devem ter a exatidão de 0,01g; para as dimensões devem ser tomadas mais de uma medida por lado ter e a precisão de 0,1mm. Para tanto, utilizou-se um paquímetro digital e um medidor de espessura digital, da fabricante Mitutoyo, e devidamente calibrados, de modo que os dados foram gerados diretamente para o software. Esses equipamentos podem ser observados nas Figuras 63 e 64.



Figura 63: Medidor digital utilizado.  
Fonte: Foto do autor.



Figura 64: Parquímetro digital utilizado no ensaio.  
Fonte: Foto do autor.

Para os corpos de prova, as especificações da norma citada anteriormente foram adaptadas, pois são amostras do painel com espessura por volta de 4mm, porém foram fabricadas manualmente de forma que pode haver alguma variação na espessura do material, e, também, as amostras tem variações de comprimento e largura. Entretanto, foram todas produzidas do mesmo material e utilizando-se as mesmas técnicas, de modo que foram feitas 7 medidas para a espessura, 3 medidas para o comprimento e 2 medidas para a largura. Na figura 65 (p. 96) pode-se observar algumas diferenças entre as peças que foram usadas para esse ensaio.



Figura 65: Corpos de prova do painel confeccionado em BaLC.  
Fonte: Foto do autor.

A densidade aparente das amostras variou entre 0,57 e 0,74g/cm<sup>3</sup>, sendo que a média dos valores para a densidade aparente foi de 0,662g/cm<sup>3</sup> com o coeficiente de variação em 4,21%, como observado na Tabela 03. Porém, os resultados demonstraram o coeficiente de variação apenas para a densidade aparente e espessura, pois os corpos de prova possuíam dimensões, massa e volume diferentes (ver tabela em anexo XI, p. 147).

Em comparação com o valor obtido por Oliveira (2013), da ordem de 0,715g/cm<sup>3</sup>, a média de densidade está próxima e com uma diferença de cerca de 8%. Ainda, PAES (2009) demonstra uma densidade aparente, para a mesma espécie de bambu, variando entre 0,68g/cm<sup>3</sup> e 0,76g/cm<sup>3</sup>.

O mesmo autor observa que Gonçalves e Rivero obtiveram os valores entre 0,57 a 0,75g/cm<sup>2</sup> e 0,58 a 0,79g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (*apud* PAES, 2009). Contudo, as densidades mencionadas foram feitas para corpos de prova que seriam expostos a ensaios físico-mecânicos e não tinham a conformação de painéis em BaLC e, portanto, para esta pesquisa será adotado o valor obtido neste ensaio de densidade aparente.

Tabela 03: Ensaio de densidade aparente do painel de BaLC produzido pelo CPAB/UnB.

Ensaio de densidade aparente do painel em BaLC				
Espécie	Adesivo	Espessura média (mm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	PU (Poliuretano) Monocomponente	3,80	0,622	4,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.9. Correção das estimativas de frequência de ressonância

Visto que houve uma alteração na densidade aparente utilizada para a estimativa dos picos de ressonância do dispositivo acústico projetado, com uma diferença do valor obtido por Oliveira (2013), foi feita uma correção dos valores anteriormente calculados, de acordo com a Figura 66.

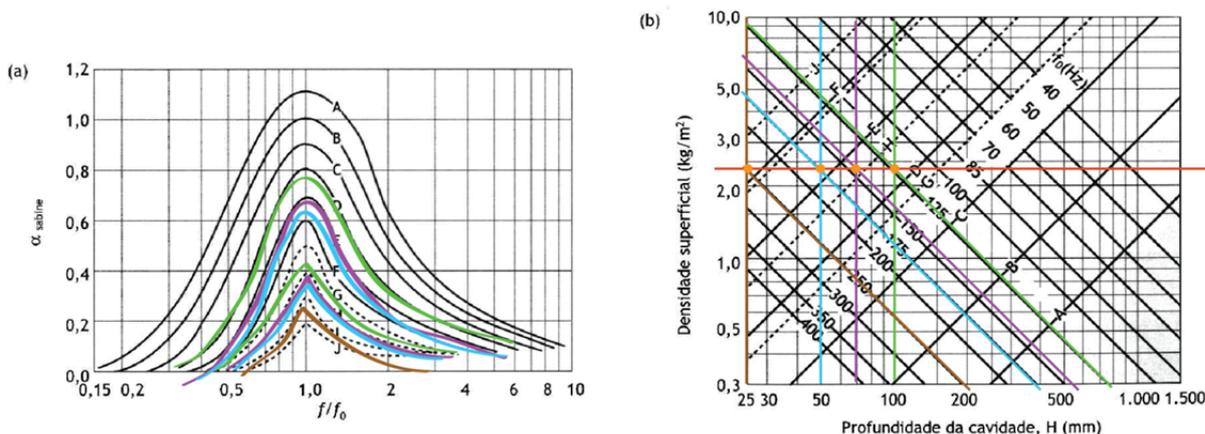


Figura 66: Correção dos picos de ressonância e estimativa de coeficiente de absorção acústica. Fonte: Adaptado de BIES e HANSEN, 2009.

Assim, na Figura 71b pode ser observado a correção da estimativa do novo pico de ressonância do sistema. Com a alteração da densidade aparente e verificação da espessura média do painel, em 3,80mm depois da produção, a densidade superficial utilizada para a previsão obteve o valor de 2,36Kg/m<sup>2</sup>. Com relação ao coeficiente de absorção acústica, podem ser observados os novos valores em 71a. As curvas e linhas verdes representam o dispositivo na montagem de 100mm de cavidade; as curvas e linhas roxas representam a cavidade de 75mm; as curvas e linhas azuis representam a cavidade com 50mm; e as curvas e linhas marrom representam a cavidade de 25mm. A Tabela 04 (p. 98) demonstra os valores de absorção calculados com auxílio da fórmula de previsão para pico de ressonância do sistema e o resumo dos dados obtidos pela Figura 66.

Tabela 04: Resumo dos modelos de absorvedor tipo membrana e a previsão de suas características acústicas.

Modelo	Câmara interna	Frequência de Ressonância (Hz)	Coefficiente de Absorção Acústica (Sabines)
BE100	Vazia	123	Entre 0,4 e 0,6
BE075	Vazia	142	Próximo a 0,4
BE050	Vazia	174	Próximo a 0,4
BE025	Vazia	247	Entre 0,2 e 0,4
BE000	-	-	-
BEL100	Lã de Vidro 50mm	123	Próximo a 0,8
BEL075	Lã de Vidro 50mm	142	Entre 0,6 e 0,8
BEL050	Lã de Vidro 50mm	174	Próximo a 0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das diferenças encontradas nos valores de densidade superficial e espessura da membrana de bambu laminado colado, os novos valores calculados ainda estão próximos daqueles anteriormente dimensionados, com alterações em torno de 10% no pico de ressonância do sistema e pouca ou nenhuma alteração no coeficiente de absorção acústica.

### 2.3. Procedimentos metodológicos para ensaio

Com a finalização do processo de execução dos protótipos passou-se para a experimentação em laboratório de acústica. Nesta etapa, obteve-se apoio do Laboratório de Engenharia Acústica da EAC/UFMS e todos os dispositivos confeccionados, 12 peças com as dimensões finais de 107x107x011cm – sendo 1m<sup>2</sup> de área livre para a vibração da membrana de bambu, foram enviados por transporte terrestre de Brasília-DF até a cidade de Santa Maria – RS, com apoio do PPG/FAUUnB.

Os procedimentos metodológicos tem por base a norma internacional ISO 354:2007: *Measurement of sound absorption in a reverberation room* (medição da absorção sonora em câmara reverberante) que determina todas as características necessárias para o ensaio, como as dimensões da câmara, as bandas de frequência, as condições ambientais e os dispositivos necessários, dentre outros. Esse método utiliza a teoria de Sabine para realizar as medições do tempo de reverberação em uma câmara, considerando um campo acústico difuso de forma que a pressão sonora seja uniformemente distribuída no ambiente em que acontece o ensaio.

### 2.3.1. Caracterização da câmara reverberante

Os protótipos do dispositivo tipo membrana ressonante foram testados na câmara reverberante do Laboratório anteriormente mencionado. Essa câmara tem paredes em ângulos não paralelos cujas dimensões variam de 7,55 a 7,90m de comprimento, 5,80 a 5,95m de largura. A altura desse recinto é também variável, sendo a menor dimensão de 4,60m e a maior de 4,75m. As medidas totalizam um volume de 207m<sup>3</sup> e, ainda, existem 5 difusores acústicos de metal suspensos por meio de correntes fixadas no teto, contribuindo para o campo acústico difuso. Possui uma porta dupla com isolamento acústico constituída em chapa de metal com 20mm de espessura e vedada com borracha. Essa câmara funciona exclusivamente para ensaios de absorção sonora. Na Figura 67 pode ser observada uma planta esquemática e cotada da câmara reverberante.

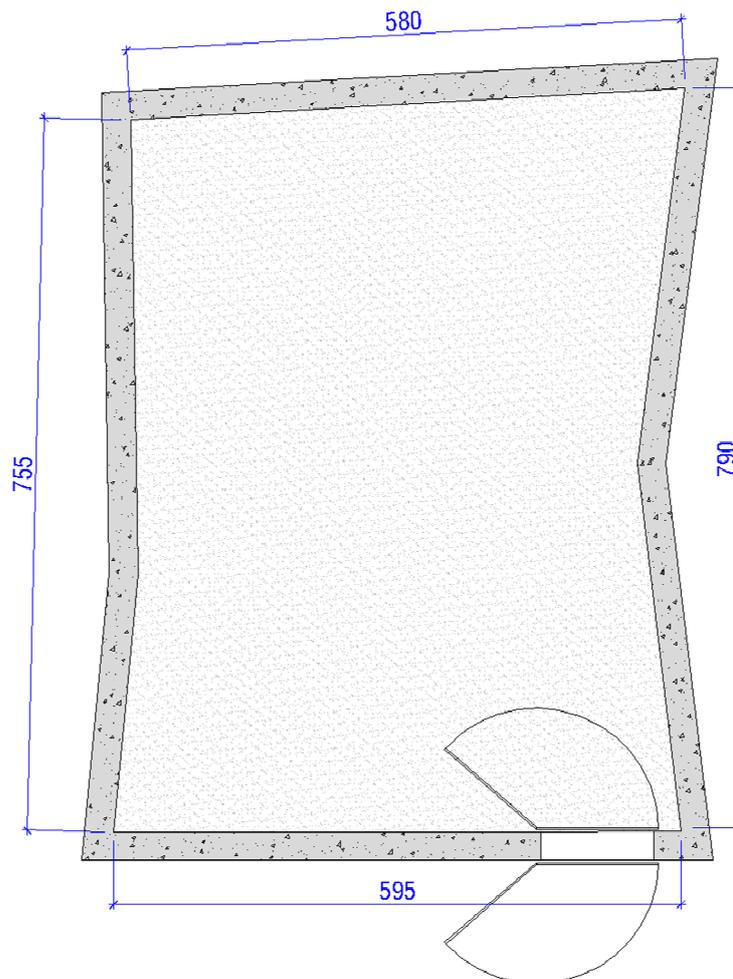


Figura 67: Planta esquemática da câmara reverberante da EAC/UFSM. Unidade: cm.  
Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 68: Câmara reverberante da EAC/UFSM.  
Fonte: [www.eac.ufsm.br](http://www.eac.ufsm.br), autor desconhecido.

### 2.3.2. Princípio de funcionamento da câmara reverberante

De acordo com a norma internacional ISO 354:2007, a absorção sonora medida para ensaios em câmara reverberante é uma determinação indireta, pois os valores encontrados nesses experimentos remetem ao tempo de reverberação da sala. Dessa forma, usando-se a formulação (Equação 03, p. 21) de Sabine, apresentada anteriormente, os tempos de reverberação por banda de frequência são medidos antes e depois da inserção dos protótipos na câmara e, assim, é determinada a área de absorção equivalente ( $A_T$ ) relativa aos dispositivos introduzidos.

Desse modo, para um material que preenche uma determinada superfície, o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) pode ser determinado pela divisão da área de absorção sonora equivalente ( $A_T$ ) obtida por meio dos ensaios, pela área ( $S$ ) que o material ocupou na câmara. Todavia, se os materiais a serem ensaiados são caracterizados como elementos individuais e idênticos entre si, como é observado na ISO 354:2007, a área de absorção sonora equivalente de cada protótipo é calculada pela divisão da área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) pelo número de elementos absorvedores inseridos na câmara (ISO 354:2007).

Para esta pesquisa o material foi disposto como um conjunto único em uma superfície. Contudo, a área total dessa superfície foi superior a  $12\text{m}^2$ , pois aros

de pressão e os anéis removíveis que apoiam as membranas geram uma área de material maior, contudo, não foram projetados para absorção sonora, apenas a membrana de bambu, com 1m<sup>2</sup> de área livre para vibrar, executa essa função. Assim, para os devidos cálculos, os protótipos foram considerados elementos individuais e idênticos entre si.

### 2.3.3. Bandas de frequências

De acordo com a norma ISO 354:2007, as medições para ensaios em câmara reverberante devem ser realizadas utilizando bandas de frequência de terço de oitava, sendo que as frequências centrais necessitam estar entre os 100 e 5000Hz. Tendo em vista a estimativa realizada para os picos de ressonância dos dispositivos e também a sua característica de absorver as baixa frequência, foram adicionadas 03 bandas de frequência aos ensaios. Assim, foram analisadas as frequências de 63 a 5000Hz. O Quadro 09 exemplifica as bandas de terço de oitava que foram analisadas na câmara reverberante.

Quadro 09: Bandas de terço de oitava para a medição nos ensaios em câmara reverberante.

Frequências de bandas de terço de oitava (Hz)						
50	63	80	100	125	160	200
250	315	400	500	630	800	1000
1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000

Fonte: ISO 354:2007.

### 2.3.4. Câmara reverberante

Para satisfazer outra condicionante exigida pela ISO 354:2007, as dimensões e a forma da câmara reverberante devem permitir a verificação da condição a seguir:

$$l_{max} \leq 1,9 \times V^{1/3}$$

(Equação 12)

Onde:

$l_{max}$  é o máximo comprimento (m) em linha reta nos limites da câmara;

$V$  é o volume da câmara reverberante (m<sup>3</sup>).

Para o caso de câmaras retangulares o  $l_{max}$  é a maior das diagonais principais, de acordo com a ISO 354:2007. Assim, devido à complexidade da forma que a câmara reverberante possui e para definir esse valor, o volume da câmara vazia foi construído em um modelo virtual tridimensional usando-se o software Skechup 8.0 com a precisão de três casas decimais nas medidas. Dessa forma o modelo virtual pode ser observado na Figura 69 e as dimensões obtidas estão presentes na Tabela 05.

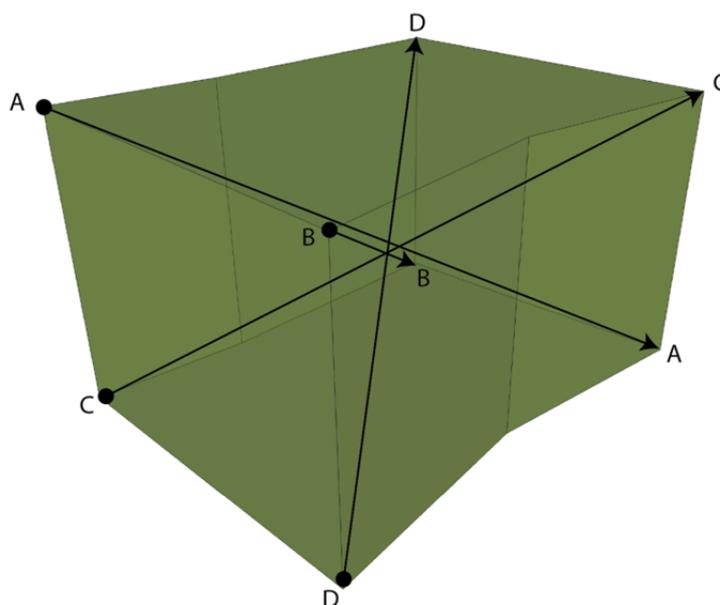


Figura 69: Modelo virtual tridimensional do volume da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da EAC/UFSM com a indicação das diagonais principais.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 05: Dados dimensionais da câmara reverberante da EAC/UFSM calculados por software de modelagem tridimensional.

Dados dimensionais da câmara reverberante da EAC/UFSM				
Volume (m <sup>3</sup> )	Diagonal AA (m)	Diagonal BB (m)	Diagonal CC (m)	Diagonal DD (m)
207	11,06	10,63	10,99	10,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se os dados obtidos com a modelagem tridimensional e sabendo-se que o volume da câmara é de 207m<sup>3</sup>, a exigência da ISO 345:2007, para as dimensões e forma da câmara reverberante, está dentro do parâmetro satisfatório. Essa comparação pode ser observada na resolução da Equação 12 apresentada anteriormente, de modo que:

$$11,06 \leq 11,24 \text{ m.}$$

### 2.3.5. Área de absorção sonora

Para a área de absorção sonora equivalente da câmara de reverberação vazia, a ISO 345:2007 exige que cada banda de terço de oitava não ultrapasse os valores constantes na Tabela 06. Contudo, esses valores foram calculados tendo por base o volume da câmara da EAC/UFSM, da ordem de 207m<sup>3</sup>, pois a norma recomenda uma correção, caso o volume dessa câmara ultrapasse 200m<sup>3</sup>, assim, os valores normativos foram multiplicados por  $(V/200)^{1/3}$  e são apresentados na referida tabela. A norma não prevê os valores para frequências abaixo de 100Hz, e tendo em vista que neste estudo os dispositivos foram dimensionados para baixas frequências, o valor de 6,65m<sup>2</sup> foi adotados para as frequências de 63, 50 e 80Hz.

Tabela 06: Limite da área de absorção sonora equivalente para a câmara reverberante vazia.

Frequência (Hz)	Área de absorção (m <sup>2</sup> )	Frequência (Hz)	Área de absorção (m <sup>2</sup> )
50	6,66	630	6,66
63	6,66	800	6,66
80	6,66	1000	7,16
100	6,66	1250	7,67
125	6,66	1600	8,18
160	6,66	2000	9,72
200	6,66	2500	10,74
250	6,66	3150	12,28
315	6,66	4000	13,30
400	6,66	5000	12,32
500	6,66		

Fonte: ISO 354:2007.

Ainda, de acordo com a norma, as área de absorção sonora equivalente da câmara vazia devem apresentar regularidade, de modo que não tenham picos nem depressões com uma diferença superior a 15% da média dos valores das frequências que correspondem às duas bandas de terço de oitava adjacentes. Portanto, a Figura 70 (p. 104) demonstra os valores obtidos em ensaio da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante da EAC/UFSM, e também representa os valores máximos presentes na Tabela 06. Pode-se observar que a área ensaiada está abaixo do limite máximo estipulado pela ISO 354:2007, e, portanto, a câmara de reverberação está em condições ideais para ensaio.

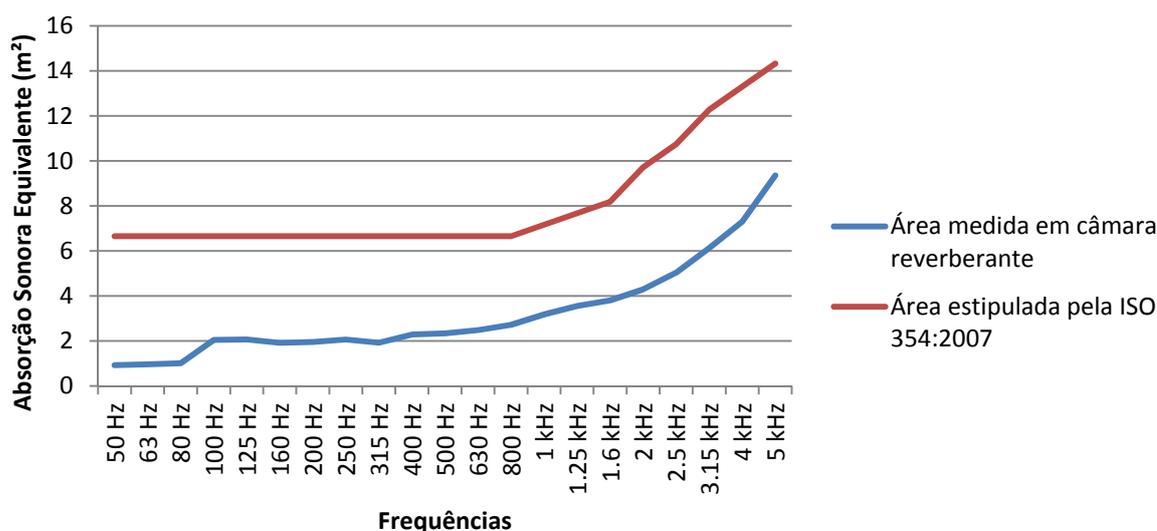


Figura 70: Área de absorção sonora equivalente da câmara vazia comparada às áreas calculadas pelo limite estabelecido pela ISO 354:2007.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.3.6. Amostras para ensaio

De acordo com a norma ISO 354:2007, as amostras de teste para a câmara reverberante podem apresentar várias formas de dimensões, assim, o método de posicionamento da amostra para o ensaio varia com o tipo de elemento que se deseja testar. Podem ser classificados como absorventes planos ou absorventes discretos. Nesta pesquisa, os absorvedores foram considerados dispositivos individuais de absorção, contudo, foram ensaiados com o posicionamento de absorventes planos, dessa forma, foram dispostos em conjunto formando um retângulo no centro da sala, com proporção de acordo com o especificado na norma.

Para o ensaio, a especificação de área de teste varia entre 10 e 12m<sup>2</sup> para uma câmara com até 200m<sup>3</sup>. Caso o ambiente de ensaio tenha um volume superior ao citado anteriormente, deve-se fazer uma correção na área de teste a ser ensaiada, de modo que os valores sejam multiplicados pelo fator de  $(V/200)^{1/3}$ . Aplicando-se a referida correção, as áreas de amostra de teste devem estar entre 10,23m<sup>2</sup> e 12,27m<sup>2</sup>. Ainda, segundo a norma, os absorvedores discretos devem ter ao menos 1m<sup>2</sup> de área de absorção, assim, conjunto dos elementos ensaiados cumpriu essa exigência, pois cada protótipo possuía essa área mínima de absorção e seu conjunto somou 12m<sup>2</sup> de superfície absorvedora.

A amostra de teste deve ter um formato retangular e relação entre comprimento e largura da ordem de 0,7 a 1,0. É recomendado que a amostra seja posicionada de modo que nenhuma das partes esteja a menos de 1m de distancia de qualquer extremidade dos limites da sala, todavia, necessitam de estar no mínimo a uma distancia de 0,75m de qualquer superfície e as bordas da amostra não devem estar paralelamente posicionadas a nenhuma das paredes da câmara (ISO 352:2007). Desse modo, o posicionamento da amostra nos ensaios realizados satisfaz todos esses requisitos e a relação entre as dimensões do conjunto foi de 0,75. Todos os ensaios foram executados com o mesmo posicionamento da amostra, de acordo com a Figura 71.

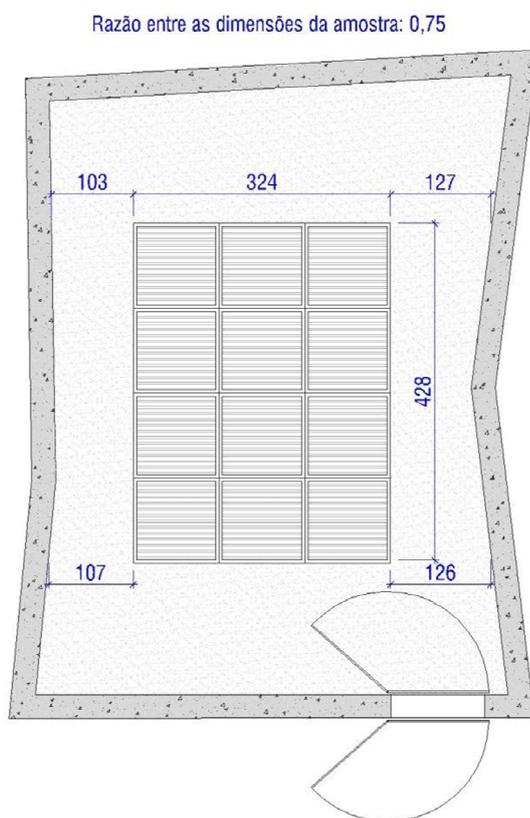


Figura 71: Planta esquemática do posicionamento da amostra em na câmara reverberante da EAC/UFSM. Sem escala.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, as variações de temperatura e umidade relativa durante as medições podem causar alterações no tempo de reverberação da câmara, principalmente nas altas frequências. Os valores recomendados pela norma para a umidade relativa no interior da sala estão entre 30% e 90% e não é recomendada a temperatura abaixo dos 15°C para os ensaios.

Caso seja necessário, devem ser aplicadas correções para a absorção do ar nas medições executadas. Contudo, as correções para umidade relativa para valores abaixo de 1000Hz não são necessárias, visto que a norma prevê o coeficiente 0,00 para essas bandas de frequência. Logo, para o enfoque desta pesquisa, absorção de baixas frequências, não foram necessárias a aplicação de correções nos valores obtidos. Durante os testes, a temperatura e umidade relativa do ar mantiveram-se sem grandes alterações, de 15,1°C a 17,8°C e 84% a 92% respectivamente (os dados podem ser verificados nos anexos I a IX).

## **2.4. Medições para o tempo de reverberação**

Para as medições de tempo de reverberação em determinada câmara, a norma ISO 324:2007 especifica que podem ser feitas através de dois métodos de análise de curvas de decaimento, os quais são o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada. Para esta pesquisa, será utilizado o método de ruído interrompido, pois é a forma de análise de dados utilizada no Laboratório de Acústica da EAC/UFMSA e também o método de resposta impulsiva integrada exige equipamentos altamente sofisticados os quais não estão disponíveis para ensaio. Dessa forma, o método de ruído interrompido é resultado de uma análise estatística para a qual é necessário calcular a média dos tempos de reverberação ensaiados, ou das várias curvas de decaimento, com a utilização de distintas posições de fonte e microfone.

### **2.4.1. Posições de fonte e microfone**

De acordo com as especificações exigidas pela norma, os microfones usados nas medições devem ser omnidirecionais e os registros devem ser feitos em diferentes posições no interior câmara. Assim, os receptores necessitam de estar afastados em, no mínimo, 1,5m entre si; ao menos 2,0m de distância da fonte sonora; e, pelo menos, a 1,0m de distância das superfícies da câmara e da amostra a ser ensaiada. As curvas de decaimento registradas em diferentes posições dos microfones não deverão ser combinadas, pois o campo criado dentro da câmara não é perfeitamente difuso. Com relação à fonte sonora, deverá ser também omnidirecional e utilizar mais de uma posição com espaçamento mínimo de 3,0m e devem ser feitas ao menos 12 curvas de decaimento independentes para cada

ensaio, podendo ser utilizadas duas fontes sonoras simultaneamente (ISO 354:2007).

Nesta pesquisa foram utilizadas uma fonte sonora, em duas posições distintas, e 6 posições de microfone para cada posição de fonte sonora, totalizando 12 medições por ensaio realizado. Em todas as posições, o receptor estava a 1,20m de altura do piso e a fonte a 1,35m de distância do piso, cumprindo a exigência de 1m de distância de qualquer superfície. Assim, na Figura 72 podem ser observadas as posições de fonte e microfone para todos os ensaios realizados e na Tabela 07 (p. 108) a descrição de cada ponto. Os pontos P1 e P7 foram usados como posicionamento tanto para a fonte quanto para microfone. Os outros pontos, P2 a P6, foram usados apenas para posicionamento de microfone.

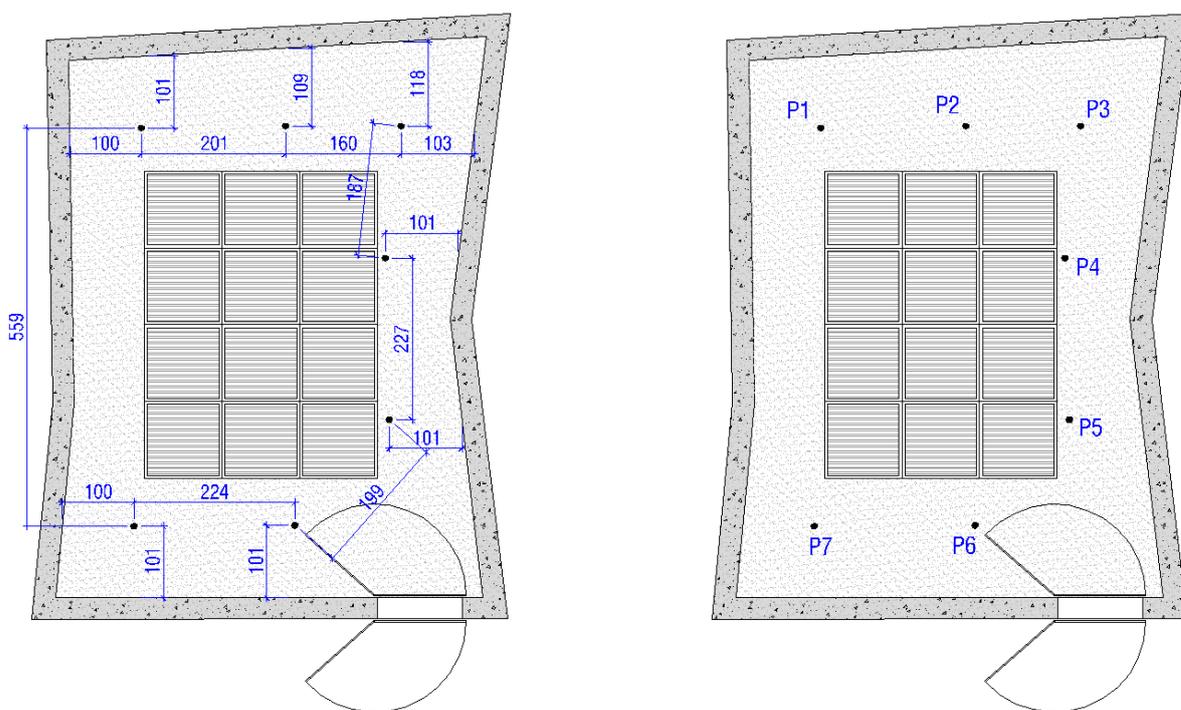


Figura 72 : Planta esquemática com os pontos de medição e distâncias entre os mesmos e as paredes.  
Sem escala.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado na Figura 77 que o distanciamento dos pontos de medição com relação à amostra ensaiada satisfaz as exigências da norma pela altura do microfone, posicionado a 1,20m de distância do piso. Assim, como demonstrado na planta esquemática, alguns pontos de receptor estão próximos aos elementos absorvedores devido às dimensões da sala.

Tabela 07: Posicionamento de fonte e microfone para realização dos ensaios.

<b>Posicionamento de fonte e microfone para a realização dos ensaios</b>					
<b>Curva de decaimento</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Fonte</b>	<b>Posição</b>	<b>Receptor</b>	<b>Posição</b>
1	S1R1	S1	P1	R1	P2
2	S1R2	S1	P1	R2	P3
3	S1R3	S1	P1	R3	P4
4	S1R4	S1	P1	R4	P5
5	S1R5	S1	P1	R5	P6
6	S1R6	S1	P1	R6	P7
7	S2R1	S2	P7	R1	P1
8	S2R2	S2	P7	R2	P2
9	S2R3	S2	P7	R3	P3
10	S2R4	S2	P7	R4	P4
11	S2R5	S2	P7	R5	P5
12	S2R6	S2	P7	R6	P6

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.4.2. Método do ruído interrompido

Os ensaios que utilizam o método do ruído interrompido necessitam de uma fonte sonora que emita um espectro contínuo de banda larga uniforme em todas as frequências, ou seja, o ruído branco. Dessa forma, a utilização do ruído de banda larga e um analisador simultaneamente devem apresentar um espectro em que a diferença dos níveis de pressão sonora resultantes no interior da câmara sejam menores que 6dB em bandas de terço de oitava adjacentes (ISO 354:2007).

De acordo com a norma, esse sinal deve ser suficientemente longo de modo a produzir níveis de pressão sonora constantes nas várias bandas de frequências. Logo, recomenda que o tempo de emissão das ondas sonoras seja, no mínimo, metade do tempo previsto para o tempo de reverberação. Ainda, o nível do sinal estabilizado deve ser suficientemente elevado para que seja superior ao ruído residual em, pelo menos, 10dB.

Nesta pesquisa, verificou-se que o sinal emitido pela fonte para as baixas frequências possuíam uma intensidade menor que as médias e altas. Isso pode ocorrer devido ao tamanho dos alto falantes da fonte omnidirecional, ou a um ruído residual elevado nessa faixa. Assim, optou-se por elevar o nível do sinal para as baixas frequências e fazer a medição por um sistema serial combinado, no qual o dispositivo de emissão do ruído concentra a energia sonora em determinadas faixas

de frequência e posteriormente emite um ruído de banda larga uniforme para as demais frequências.

Para cada posição de microfone e fonte, a norma recomenda um mínimo de três medições, de modo a reduzir a incerteza dos dados coletados e possíveis desvios estatísticos. Após a realização deste procedimento, o equipamento registra os valores médios das curvas de decaimento ou do tempo de reverberação e, em seguida, podem ser utilizados dois métodos para o cálculo da média.

O primeiro consiste em determinar a média dos registros das curvas de decaimento para uma determinada posição de fonte e microfone, para tanto a norma internacional ISO 354:2007 recomenda a utilização da seguinte equação:

$$L_p = 10 \times \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right]$$

(Equação 13)

Onde:

$L_p(t)$  é o nível de pressão sonora médio, no instante  $t$ , calculado para  $N$  decaimentos;

$L_{pn}(t)$  é o nível de pressão sonora do decaimento de ordem  $n$ , no instante  $t$ ;

$N$  é o número de decaimentos.

Esse método é conhecido como média de conjunto, sendo bastante utilizado em sistemas informatizados de medição e avaliação de tempo de reverberação, e, portanto é utilizado no decorrer dos ensaios em câmara reverberante. A média das curvas de decaimento deve ser calculada para cada posição de fonte e microfone de forma a se obter o tempo de reverberação para a banda de frequência de terço de oitava. Em seguida, executa-se o mesmo procedimento para as demais combinações de emissor e receptor e, assim, obtém-se um conjunto de tempos de reverberação médios. Por fim, o tempo de reverberação final da câmara, para determinado ensaio, consiste na média aritmética de todos os valores obtidos para os tempos de reverberação ensaiados (ISO 254:2007).

O segundo método para cálculo das médias, de acordo com a norma ISO 354:2007, é aplicável quando a média do conjunto não pode ser utilizada. A curva de decaimento única deve ser avaliada primeiramente e, em seguida, os tempos de reverberação resultantes devem ser calculados usando-se a média aritmética. Para as curvas de decaimento gravas em diferentes posições de emissor e receptor, não deve ser calculada a média. Contudo, para esta pesquisa foi utilizado o primeiro método, pois as curvas foram medidas por software e equipamento com a execução automática da média de conjuntos.

Nos ensaios em câmara reverberante, o tempo de reverberação pode ser avaliado a partir do decaimento de 20dB (T20) ou 30dB (T30), extrapolando-se o resultado obtido para os 60dB. Para tanto, nos ensaios, o nível de pressão sonora inicial deve ser de 5dB inferior ao nível máximo dessa pressão e o nível final do intervalo deve ser superior ao ruído residual em 10dB. Assim, a primeira condição apresentado tem o objetivo de formar perfeitamente a curva de decaimento e a segunda condição visa suprimir qualquer interferência que o ruído de fundo poderia causar. Ainda, os sistemas informatizados automatizados, como os que foram utilizados nesta pesquisa, para determinação de tempo de reverberação e avaliação dos intervalos, executam uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados para verificar precisamente o tempo de reverberação dos ensaios a que são submetidos.

Com relação aos equipamentos e softwares utilizados, a seguir são apresentados seus fabricantes e modelos:

- a) Sistema de aquisição de dados: *Sound Level Meter Brüel & Kjaer* – Modelo 2270 bp2025;
- b) *Software* de aquisição e tratamento de dados: *Frequency Analysis Brüel & Kjaer* bp2430 e bp2152;
- c) Amplificador *Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2716*;
- d) 1 Fonte Sonora *Brüel & Kjaer OmniPower Source Type* bp1689;
- e) 1 Microfone *Brüel & Kjaer* <sup>1/2</sup> *Type* 4189 bp2210 com pré-amplificador;
- f) Calibrador *Brüel & Kjaer Type* bp1311;
- g) Medidor termo-higrômetro digital Kiltler Mod. 986HI.

### 2.4.3. Tempo de reverberação e área de absorção sonora equivalente

Para a apresentação dos dados, os tempos de reverberação da câmara são determinados por meio da média aritmética do total das medições, considerando antes e depois ( $T_0$  e  $T_1$ ) da inserção das amostras para teste. Por conseguinte, a área de absorção sonora equivalente para cada banda de frequência, considerando antes e depois da inserção das amostras para ensaio ( $A_0$  e  $A_1$ ), em  $m^2$ , é calculada com a Equação 14 a seguir (ISO 354:2007):

$$A_i = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot TR_i} - Vm_i$$

(Equação 14)

Onde:

$V$  é o volume da câmara reverberante vazia ( $m^3$ );

$c$  é a velocidade de propagação do som no ar, celeridade (m/s)

$TR_i$  é o tempo de reverberação medido;

$m_i$  é o coeficiente de atenuação devido à absorção sonora do ar;

Logo, calculando-se a diferença da área de absorção equivalente de antes e depois da inserção das amostras de ensaio na câmara reverberante é obtida a área de absorção sonora equivalente do protótipo ensaiado ( $A_0$ ), assim, calculando-se com a Equação 15:

$$A_t = A_0 - A_1 = 55,3 \cdot V \left( \frac{1}{c_1 \cdot T_1} - \frac{1}{c_0 \cdot T_0} \right) - V(m_1 - m_0)$$

(Equação 15)

Como os protótipos ensaiados são um conjunto de elementos idênticos entre si, mas preenchem uma superfície plana, o cálculo do coeficiente de absorção sonora foi feito com base na área total de absorção do conjunto de dispositivos acústicos.

### 2.4.4. Cálculo do coeficiente de absorção sonora

Segundo a ISO 354:2007, o cálculo do coeficiente de absorção sonora do material ( $\alpha_s$ ) é determinado pela divisão da área de absorção sonora total ensaiada

( $A_T$ ) pelo número dispositivos de absorção sonora inseridos na câmara reverberante ( $S$ ), assim, obtém-se esse coeficiente para cada um dos painéis tipo membrana ressonante. O resultado deve ser arredondado à centésima casa decimal, de acordo com a Equação 16 a seguir:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

(Equação 16)

## **CAPÍTULO III – RESULTADOS**

### 3.1. Ensaio realizados e resultados em câmara reverberante

Após a verificação dos procedimentos metodológicos para a execução de ensaios em câmara reverberante, com a apresentação das condicionantes que a norma ISO 354:2007 exige, e tendo em vista os pré-dimensionamentos feitos anteriormente, serão apresentados os resultados ensaios no Laboratório de Engenharia Acústica da EAC/UFSM. Os protótipos foram analisados em 08 distintas montagens, com a cavidade vazia e nas espessuras de 100, 75, 50 e 25mm de camada de ar, com a cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm, nas montagens de 100, 75 e 50mm e sem cavidade, apenas as membranas em bambu. Não foi executado o ensaio com lã de vidro na montagem em 25mm. Em todos os ensaios os painéis seguiram a mesma disposição, como um conjunto formando 12 painéis, e 12m<sup>2</sup> de área de absorção, no interior da sala, de acordo com a Figura 73.

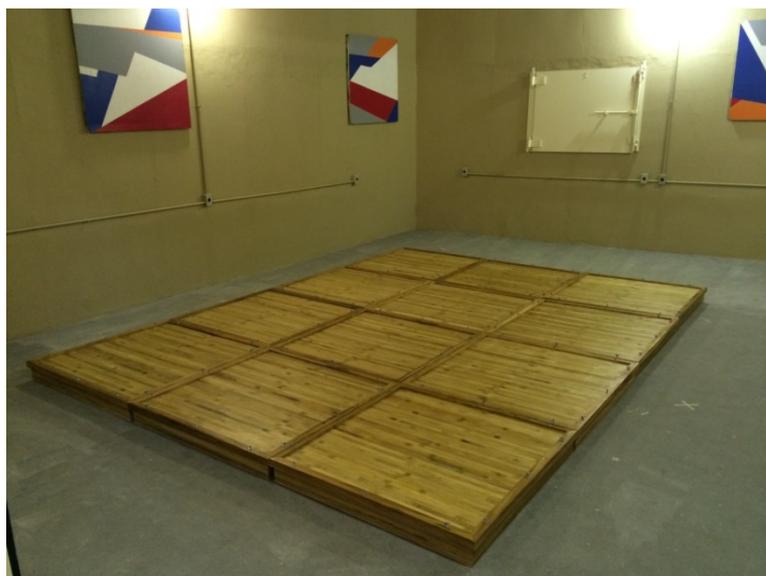


Figura 73: Distribuição base dos painéis durante os ensaios em câmara reverberante.  
Fonte: Foto do Autor.

Logo, as análises foram feitas tendo por base as diferentes camadas de ar no interior do dispositivo e a influência dessa cavidade no coeficiente de absorção do material. Para tanto, foi verificado se o bambu laminado colado segue os mesmos parâmetros da madeira para pré-dimensionamento de painel ressonante, pois a previsão foi feita com base no estudo para compensado de madeira, de modo que o resultado final pode ser diferente daquele apresentado. Vale ressaltar que o BaLC com a proposição de uso para dispositivos de absorção sonora tipo membrana

ressonante ainda é pouco explorado e espera-se que este estudo incentive o uso dos derivados do bambu, principalmente do laminado colado, para o condicionamento acústico de salas.

### 3.1.1. Ensaio realizados em laboratório

Foram realizados 08 ensaios acústicos de absorção sonora utilizando-se diferentes cavidades, vazias e com preenchimento, para o dispositivo tipo membrana ressonante, mas mantendo o mesmo posicionamento no interior da câmara. Pretende-se, com os ensaios, avaliar o pré-dimensionamento feito e saber qual das espessuras de ar no interior, vazio ou preenchido com lã de vidro, obteve desempenho superior, para um possível desenvolvimento posterior de um produto de mercado. Na Tabela 08 são apresentadas as condições de cada ensaio.

Tabela 08: Ensaio realizados em câmara reverberante, configurações e previsões.

Código do ensaio	Preenchimento	Espessura da camada de ar (mm)	Previsão de frequência de Ressonância (Hz)	Previsão de coeficiente de Absorção Acústica
BE100	Vazia	100	123	Entre 0,4 e 0,6
BE075	Vazia	75	142	Próximo a 0,4
BE050	Vazia	50	174	Próximo a 0,4
BE025	Vazia	25	247	Entre 0,2 e 0,4
BE000	-	00	-	-
BEL100	Lã de Vidro 50mm	100	123	Próximo a 0,8
BEL075	Lã de Vidro 50mm	75	142	Entre 0,6 e 0,8
BEL050	Lã de Vidro 50mm	50	174	Próximo a 0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2. Configurações dos decaimentos sonoros

Para cada uma das espessuras da camada de ar na cavidade, ensaiou-se o tempo de reverberação da câmara com a amostra ( $TR$ ) pelo método do ruído interrompido, com 3 decaimentos configurados no parâmetro serial combinado, no qual a energia sonora para o ruído branco foi concentrada nas frequências de 50Hz, 63Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 150Hz e 160Hz e 200Hz e, em seguida, o equipamento faz os decaimentos para as outras bandas de terço de oitava para obter o tempo de reverberação da câmara com a amostra. Após os decaimentos foi calculada a área de absorção equivalente total para cada banda de frequência da amostra ( $A_T$ ) e, por fim, o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) para as bandas de frequência e para cada conformação de cavidade dos painéis.

### 3.1.3. Resultados dos tempos de reverberação (TR)

Foi ensaiado o tempo de reverberação da câmara vazia e depois o mesmo tempo com a inserção das amostras no interior. Contudo, notou-se um comportamento não linear no decaimento da câmara vazia. Isso pode ocorrer devido a falta de potências dos autos falantes da fonte sonora para as baixas frequências, de 50Hz e 63Hz ou a um ruído de fundo. Dessa forma, elevou-se o nível de pressão sonora dentro da câmara para garantir que os cálculos pudessem ser executados com exatidão. Na Figura 74 podem ser observados os TRs da câmara vazia e com as amostras.

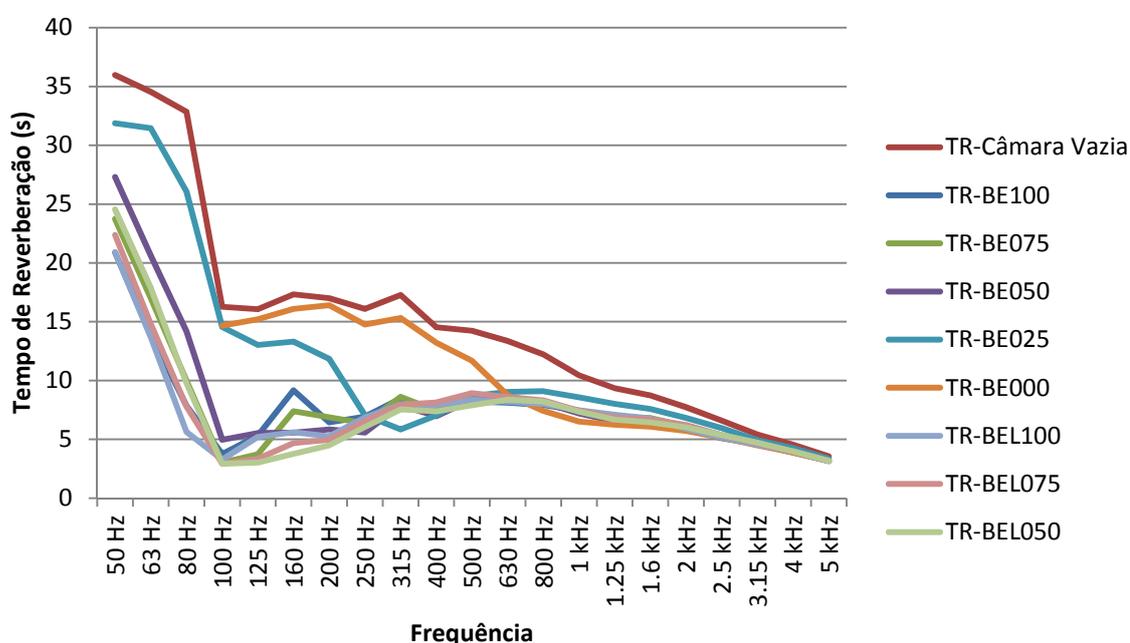


Figura 74: Tempos de reverberação dos ensaios realizados em câmara reverberante (TR).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado, as maiores depressões da Figura 79 estão na faixa de 80 a 200Hz, o que coincide com os picos de absorção pré-dimensionados, e quando comparadas ao TR da câmara vazia indica que houve absorção nessas bandas de frequência. A Tabela 09 (p. 117) demonstra os resultados para os tempos de reverberação obtidos nos ensaios em câmara reverberante, com os dados de cada ensaio mensurados em segundos. Durante o ensaio do BE000, o ruído de fundo interferiu nas frequências abaixo de 100Hz, contudo, não constitui uma alteração significativa, pois esse ensaio teve o objetivo de apenas determinar o coeficiente de absorção acústica para o BaLC como revestimento e sem cavidade.

Tabela 09: Tempos de reverberação obtido nos ensaios em câmara reverberante (TR).

Tempos de reverberação obtidos nos ensaios em câmara reverberante									
Preenchimento	Câmara Vazia (s)	Cavidade Vazia				Sem cavidade	Cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm de espessura		
Frequência		BE100 (s)	BE075 (s)	BE050 (s)	BE025 (s)		BE000 (s)	BEL100 (s)	BEL075 (s)
50 Hz	35,97	20,88	23,73	27,30	31,87	-	20,90	22,37	24,55
63 Hz	34,54	13,93	17,01	20,62	31,45	-	13,68	14,82	17,89
80 Hz	32,85	7,85	10,00	14,18	26,06	-	5,63	7,80	9,77
100 Hz	16,27	3,76	3,03	4,97	14,54	14,67	3,29	2,94	2,92
125 Hz	16,06	5,32	3,73	5,54	13,02	15,21	5,21	3,35	3,02
160 Hz	17,33	9,17	7,40	5,56	13,31	16,09	5,60	4,68	3,77
200 Hz	17,00	6,45	6,88	5,85	11,84	16,41	5,27	4,96	4,49
250 Hz	16,09	6,94	6,37	5,58	7,06	14,76	6,86	6,55	6,05
315 Hz	17,27	8,47	8,61	7,90	5,85	15,32	7,98	7,95	7,54
400 Hz	14,53	7,50	7,44	6,97	7,04	13,21	7,91	8,14	7,38
500 Hz	14,24	8,22	8,56	8,38	8,68	11,68	8,37	8,93	7,89
630 Hz	13,37	8,12	8,33	8,65	9,03	8,77	8,20	8,60	8,37
800 Hz	12,22	7,93	8,16	8,11	9,09	7,42	8,00	8,32	8,21
1 kHz	10,45	7,42	7,42	7,21	8,58	6,51	7,47	7,42	7,36
1,25 kHz	9,35	6,86	6,89	6,54	8,02	6,24	7,09	6,85	6,67
1,6 kHz	8,74	6,75	6,81	6,36	7,58	6,08	6,78	6,69	6,44
2 kHz	7,74	5,97	6,13	5,86	6,82	5,71	5,90	6,23	6,02
2,5 kHz	6,59	5,10	5,35	5,29	5,96	5,14	5,17	5,36	5,37
3,15 kHz	5,42	4,61	4,61	4,63	4,93	4,49	4,54	4,68	4,72
4 kHz	4,55	3,88	4,00	3,96	4,26	3,88	3,97	3,99	3,98
5 kHz	3,55	3,16	3,19	3,22	3,35	3,16	3,16	3,19	3,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4. Resultados das áreas de absorção sonora equivalente ( $A_t$ )

Com os ensaios dos tempos de reverberação apresentados, e tendo em vista a equação apresentada para a absorção sonora equivalente ( $A_t$ ), calculou-se essa área de absorção para cada uma das montagens dos protótipos. Assim, pode ser observado na Figura 75 (p. 119) o gráfico com todos os resultados obtidos separados por banda de frequência e na Tabela 10 (p. 118) a demonstração desses dados. Logo, as conformações que obtiveram maior área de absorção foram aquelas com a cavidade preenchida com lã de vidro, seguidos pelas conformações da cavidade vazia com maior espessura, indicando assim que os coeficientes de absorção acústica podem seguir a mesma organização.

Entretanto, a montagem BE075 obteve maior área de absorção do que o BE100, o que pode indicar que o BaLC tem um comportamento diferenciado para essa espessura de cavidade vazia. Ainda, o gráfico demonstra que a montagem BE075 aproxima-se das áreas mais altas, e, portanto sugerindo um comportamento acústico da cavidade vazia semelhante à cavidade preenchida com lã.

Tabela 10: Área de absorção equivalente de cada ensaio por espectro de frequência ( $A_i$ ).

Preenchimento	Área de absorção equivalente calculada por banda de frequência							
	Cavidade vazia				Sem cavidade	Cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm de espessura		
Frequência	BE100 (m <sup>2</sup> )	BE075 (m <sup>2</sup> )	BE050 (m <sup>2</sup> )	BE025 (m <sup>2</sup> )	BE000 (m <sup>2</sup> )	BEL100 (m <sup>2</sup> )	BEL075 (m <sup>2</sup> )	BEL050 (m <sup>2</sup> )
50 Hz	0,667	0,476	0,293	0,119	-	0,666	0,561	0,429
63 Hz	1,423	0,991	0,649	0,094	-	1,466	1,279	0,895
80 Hz	3,220	2,310	1,331	0,263	-	4,888	3,247	2,388
100 Hz	6,791	8,919	4,641	0,243	0,223	8,053	9,255	9,332
125 Hz	4,175	6,836	3,927	0,483	0,116	4,307	7,846	8,929
160 Hz	1,705	2,572	4,057	0,579	0,148	4,014	5,180	6,893
200 Hz	3,195	2,874	3,723	0,851	0,070	4,348	4,742	5,443
250 Hz	2,721	3,150	3,888	2,640	0,186	2,777	3,006	3,425
315 Hz	1,998	1,934	2,281	3,754	0,245	2,239	2,254	2,482
400 Hz	2,142	2,178	2,479	2,432	0,228	1,913	1,794	2,214
500 Hz	1,708	1,548	1,631	1,494	0,511	1,636	1,387	1,877
630 Hz	1,606	1,503	1,355	1,194	1,303	1,566	1,378	1,484
800 Hz	1,470	1,352	1,377	0,936	1,758	1,434	1,274	1,327
1 kHz	1,298	1,298	1,428	0,693	1,923	1,268	1,298	1,334
1,25 kHz	1,289	1,268	1,526	0,589	1,770	1,132	1,296	1,427
1,6 kHz	1,120	1,077	1,422	0,582	1,662	1,098	1,164	1,357
2 kHz	1,272	1,127	1,377	0,579	1,525	1,338	1,040	1,226
2,5 kHz	1,472	1,168	1,238	0,533	1,422	1,384	1,156	1,145
3,15 kHz	1,077	1,077	1,046	0,609	1,269	1,188	0,969	0,909
4 kHz	1,260	1,004	1,087	0,497	1,260	1,066	1,024	1,045
5 kHz	1,155	1,056	0,959	0,559	1,155	1,155	1,056	1,088

Fonte: Elaborado pelo autor.

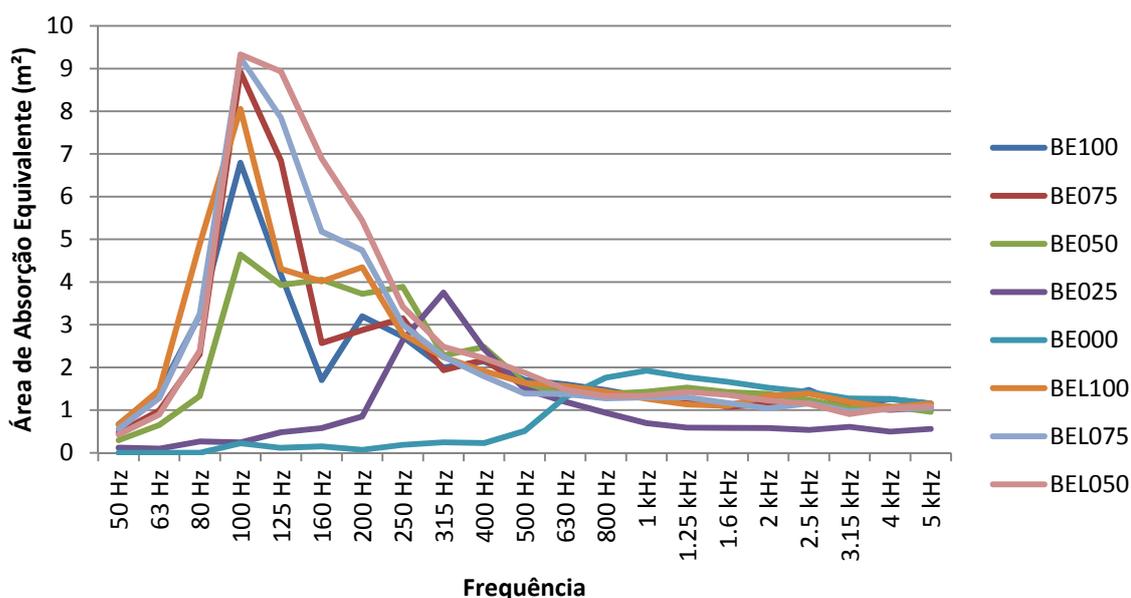


Figura 75: Área de absorção sonora equivalente calculada para cada ensaio por banda de frequência.  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.5. Resultados do cálculo dos coeficientes de absorção sonora ( $\alpha_s$ )

Por fim, calculou-se o coeficiente de absorção sonora, segundo a Equação 16, com base nas áreas de absorção equivalentes encontradas para as diversas montagens dos painéis de BaLC. Os resultados podem ser visualizados na Figura 76 (p. 120) e na Tabela 11 (p. 120).

Tendo em vista os indicativos da área de absorção equivalente e dos tempos de reverberação, demonstrados anteriormente, constatou-se que os coeficientes de absorção sonora foram mais elevados nas bandas de 80Hz a 200Hz, para as configurações do dispositivo com a cavidade preenchida com a lã de vidro. Entretanto, o ensaio BE075, com a cavidade vazia, demonstrou um resultado bastante expressivo, pois seu coeficiente de absorção sonora máximo na frequência de ressonância do sistema, observada em 100Hz, chegou próximo ao dos ensaios com a cavidade preenchida, de acordo com a Figura 81 (p. 126). Para todos os ensaios com a cavidade vedada, BE100, BE075, BE050, BEL100, BEL075 e BEL050, a frequência de ressonância do dispositivo manteve-se em 100Hz. Os valores mais elevados para o coeficiente de absorção sonora, na referida frequência de ressonância, foram constatados no ensaio BEL050, seguido do BEL075 e depois o BE075.

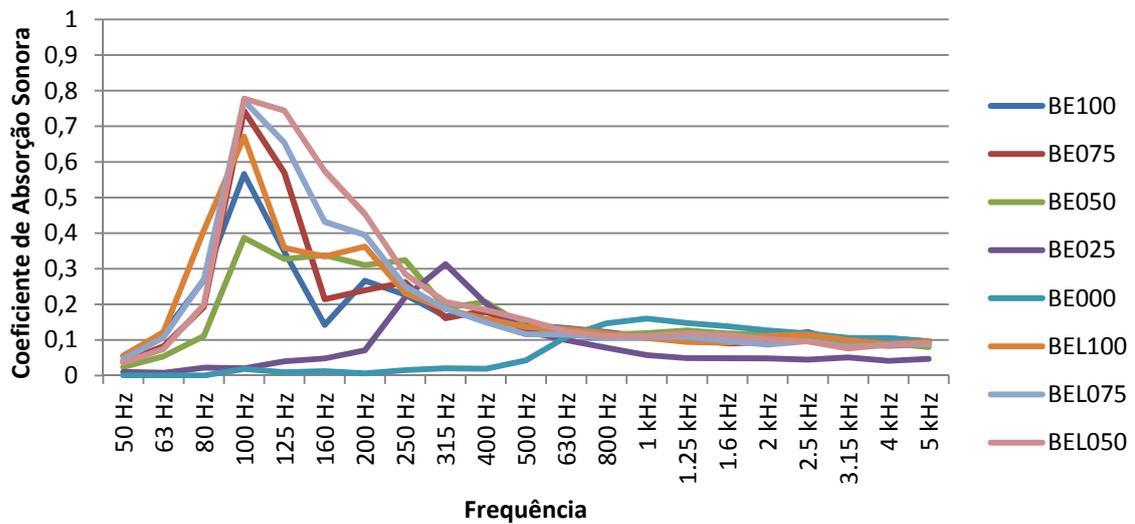


Figura 76: Coeficiente de absorção sonora calculado para cada ensaio por banda de frequência ( $\alpha_s$ ).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11: Coeficientes de absorção sonora de cada ensaio por banda de frequência.

Coeficiente de absorção sonora por banda de frequência em Sabines ( $\alpha_s$ )								
Preenchimento	Cavidade vazia				Sem cavidade	Cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm de espessura		
Frequência	BE100	BE075	BE050	BE025	BE000	BEL100	BEL075	BE050
50 Hz	0,056	0,040	0,024	0,010	-	0,055	0,047	0,036
63 Hz	0,119	0,083	0,054	0,008	-	0,122	0,107	0,075
80 Hz	0,268	0,193	0,111	0,022	-	0,407	0,271	0,199
100 Hz	0,566	0,743	0,387	0,020	0,019	0,671	0,771	0,778
125 Hz	0,348	0,570	0,327	0,040	0,010	0,359	0,654	0,744
160 Hz	0,142	0,214	0,338	0,048	0,012	0,335	0,432	0,574
200 Hz	0,266	0,239	0,310	0,071	0,006	0,362	0,395	0,454
250 Hz	0,227	0,262	0,324	0,220	0,015	0,231	0,251	0,285
315 Hz	0,166	0,161	0,190	0,313	0,020	0,187	0,188	0,207
400 Hz	0,179	0,182	0,207	0,203	0,019	0,159	0,150	0,185
500 Hz	0,142	0,129	0,136	0,124	0,043	0,136	0,116	0,156
630 Hz	0,134	0,125	0,113	0,099	0,109	0,131	0,115	0,124
800 Hz	0,123	0,113	0,115	0,078	0,147	0,119	0,106	0,111
1 kHz	0,108	0,108	0,119	0,058	0,160	0,106	0,108	0,111
1,25 kHz	0,107	0,106	0,127	0,049	0,148	0,094	0,108	0,119
1,6 kHz	0,093	0,090	0,118	0,048	0,139	0,092	0,097	0,113
2 kHz	0,106	0,094	0,115	0,048	0,127	0,112	0,087	0,102
2,5 kHz	0,123	0,097	0,103	0,044	0,118	0,115	0,096	0,095
3,15 kHz	0,090	0,090	0,087	0,051	0,106	0,099	0,081	0,076
4 kHz	0,105	0,084	0,091	0,041	0,105	0,089	0,085	0,087
5 kHz	0,096	0,088	0,080	0,047	0,096	0,096	0,088	0,091

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2. Análise dos resultados

Com a exposição dos resultados encontrados para os ensaios de coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante, pode-se perceber que o painel de bambu laminado colado apresentou um comportamento acústico promissor. Todos os resultados foram obtidos com a mesma disposição dos painéis e as configurações dos equipamentos com pouca variação da temperatura e da umidade relativa durante os ensaios. Além dos dispositivos tipo membrana ressonante, foi feito também o ensaio dos coeficientes de absorção sonora da lã de vidro, porém esse ensaio não faz parte da análise do material em BaLC e foi executado apenas para a comparação com as especificações fornecidas pelo fabricante. Assim, nos próximos itens serão confrontados os dados de pré-dimensionamento do dispositivo e os valores ensaiados em laboratório.

### 3.2.1. Painéis com cavidade vazia (ensaios BE100, BE075 e BE050)

Os painéis com cavidade vazia e espessura da camada de ar com 100, 75 e 50mm serão analisados em conjunto, pois constituem sistemas semelhantes com apenas a variação da camada de ar interna e, portanto, conformam sistemas fechados no qual não há comunicação direta do ar da cavidade interna dos dispositivos com o meio externo. Nesses ensaios, os protótipos foram vedados pelos anéis removíveis onde foi aplicada a pressão nas bordas da membrana por meio do aro e dos parafusos com porcas e arruelas, de modo que o sistema se tornasse uma peça rígida. A Figura 77 (p. 122) demonstra os resultados para os ensaios citados. Os resultados demonstraram que o sistema de absorção sonora obteve valores significativos entre as frequências de 80Hz a 400Hz.

De acordo com o pré-dimensionamento, para a montagem BE100 do dispositivo, foi previsto um pico acentuado de absorção na faixa de 123Hz, com coeficiente de absorção sonora entre 0,4 e 0,6. Ao observar os resultados obtidos na câmara reverberante, constatou-se um pico de absorção acentuado na faixa de 100Hz, de modo que a frequência de ressonância calculada divergiu daquela ensaiada em laboratório. O valor máximo de coeficiente de absorção sonora obtido foi de 0,56 no pico de ressonância, corroborando a previsão do dimensionamento de projeto. Assim, a absorção do painel, com a cavidade de 100mm, aumenta até o pico

de ressonância e diminui até a frequência de 160Hz, em seguida apresenta um pico menor na faixa de 200Hz, com o valor de 0,26 e depois volta a diminuir gradativamente.

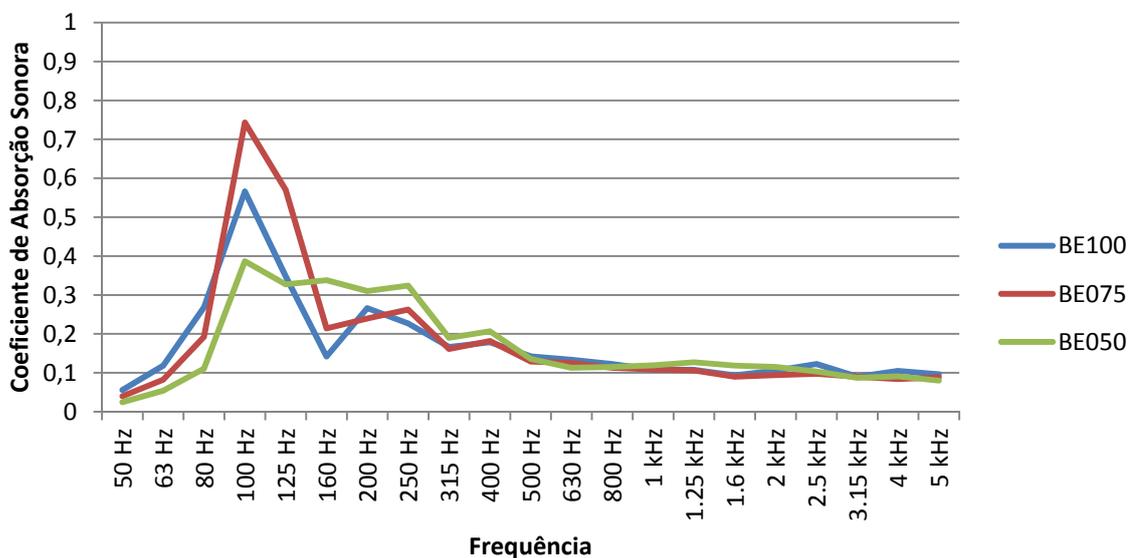


Figura 77: Coeficiente de Absorção sonora dos ensaios BE100, BE075 e BE050 ( $\alpha_s$ ).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

A estimativa para BE075 previa o pico de ressonância do sistema em 142Hz e um coeficiente de absorção sonora próximo de 0,4. Entretanto, o resultado obtido em laboratório mostrou-se diferente e superior à estimativa calculada. A frequência de ressonância do sistema manteve-se em 100Hz e, assim como na amostra BE100, demonstrou também um pico acentuado, todavia, obteve-se o máximo valor de coeficiente de absorção sonora em 0,74, demonstrando uma grande diferença com relação a previsão estimada. O comportamento da curva manteve-se semelhante ao ensaio anterior, com a elevação do coeficiente de absorção até o pico de ressonância e, em seguida, decaindo até 160Hz, onde eleva-se novamente, a um pico de 0,26 em 250Hz e depois decai gradativamente.

O cálculo da frequência de ressonância para BE050 estimou o pico de absorção na faixa de 174Hz e o máximo valor para o coeficiente de absorção sonora próximo de 0,4. Com a observação dos valores encontrados no ensaio, constatou-se que a frequência de ressonância manteve-se em 100Hz, como nos demais ensaios, divergindo do que foi previsto. Contudo, o coeficiente de absorção sonora máximo foi de 0,38, corroborando a estimativa da previsão teórica. A curva apresentada também não comportou-se como o previsto, pois não apresenta um pico acentuado,

de modo que mantém-se um coeficiente de absorção sonora semelhante dos 100Hz aos 250Hz e, em seguida, decai progressivamente.

Em todos os ensaios citados o pico de absorção na frequência de ressonância dos painéis obteve uma reincidência na faixa 100Hz, de modo que em nenhum dos ensaios chegou-se ao calculado. Para os ensaios BE100 e BE075 os coeficientes de absorção sonora se comportaram de acordo com a expectativa, contudo, o ensaio BE050 não apresentou uma curva com pico de absorção sonora acentuado. Com a cavidade vazia, na conformação BE075 foi observada maior divergência com relação às estimativas, de modo que obteve o maior dos coeficientes de absorção sonora na frequência de ressonância do sistema. Logo, esperava-se uma divergência nos resultados, visto que a previsão de comportamento acústico foi baseada na estimativa utilizada para o compensado de madeira. Portanto, os valores obtidos foram acima das expectativas, ressaltando a potencialidade do BaLC para o condicionamento acústico. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos até a frequência de 400Hz, quando os coeficientes começam a decair progressivamente.

Tabela 12: Coeficiente de absorção sonora de 50 a 400Hz para BE100, BE075 e BE050.

Coeficiente de absorção sonora para ensaios com a cavidade vazia ( $\alpha_s$ )										
Frequência	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz
BE100	0,056	0,119	0,268	0,566	0,348	0,142	0,266	0,227	0,166	0,179
BE075	0,040	0,083	0,193	0,743	0,570	0,214	0,239	0,262	0,161	0,182
BE050	0,024	0,054	0,111	0,387	0,327	0,338	0,310	0,324	0,190	0,207

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2. Painel com cavidade vazia tipo BE025

Os dispositivos na montagem BE025 têm como único parâmetro de comparação a previsão de seu comportamento acústico, pois nessa conformação a moldura externa não exerce pressão sobre o sistema e também não há vedação total. O cálculo e as estimativas previam uma frequência de ressonância em 247Hz, com uma curva de absorção com pico acentuado, e coeficiente de absorção sonora entre 0,2 e 0,4. Na Figura 78 (p.124) está representado o comportamento acústico ensaiado em laboratório para BE025.

Como pode ser observado, o valor máximo para o coeficiente de absorção sonora está de acordo com a previsão, com o valor de 0,31 e um pico de ressonância acentuado. Porém a frequência de ressonância do sistema ocorreu em 315Hz, com ascensão a partir de 200Hz e decaimento depois de 500Hz. Esse experimento foi executado apenas para se obter um parâmetro inicial para a cavidade de 25mm e uma primeira análise do comportamento da cavidade sem estar completamente lacrada. Na Figura 79 pode ser observada a conformação dos painéis dentro da câmara e na Tabela 13 (p. 125), os valores de coeficiente de absorção por banda de frequência.

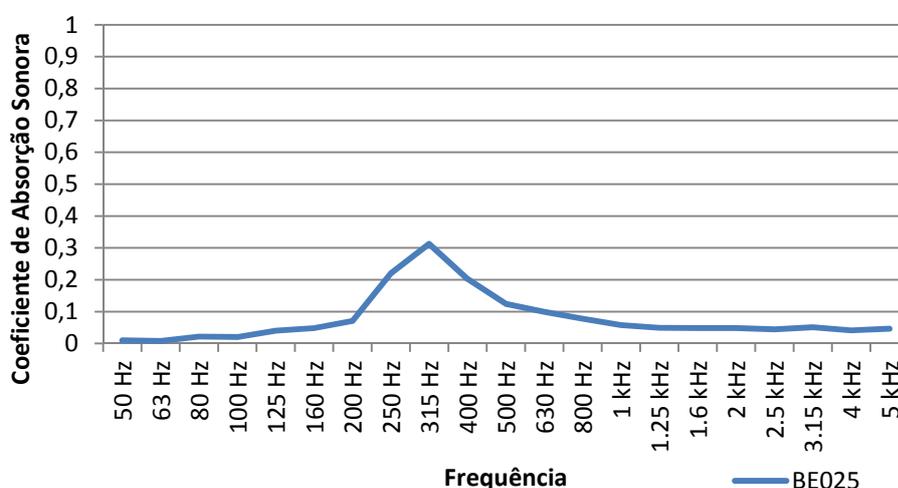


Figura 78: Coeficientes de absorção sonora obtidos em câmara reverberante para BE025 ( $\alpha_s$ ).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

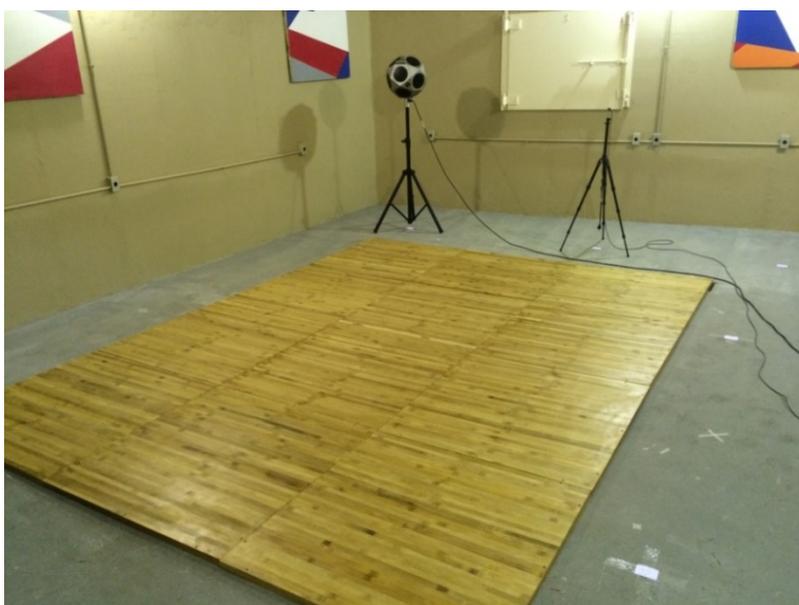


Figura 79: Disposição do ensaio BE025 em câmara reverberante.  
Fonte: Foto do autor.

Tabela 13: Coeficiente de absorção sonora para BE025 por espectro de frequência.

Coeficiente de absorção sonora de 50 - 800Hz e cavidade sem vedação ( $\alpha_s$ )													
Frequência	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630Hz	800Hz
BE025	0,010	0,008	0,022	0,020	0,040	0,048	0,071	0,220	0,313	0,203	0,124	0,099	0,078

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3. Painel sem cavidade tipo BE000

O ensaio BE000 da membrana de bambu laminado colado sem cavidade foi executado para verificar o comportamento acústico do material como revestimento. Assim, não houve previsão para este ensaio, pois a membrana sem cavidade não funcionaria como um sistema ressonante, apenas esperava-se pouca absorção em altas frequências. Vale lembrar que o tratamento da superfície do material foi feito com seladora de madeira, fabricante Sayerlack, apenas para evitar a absorção de umidade em excesso, porém a superfície interna não foi lixada, e, portanto, resultando em uma discreta rugosidade e porosidade. A Figura 80 demonstra o gráfico de coeficiente de absorção sonora por banda de frequência.

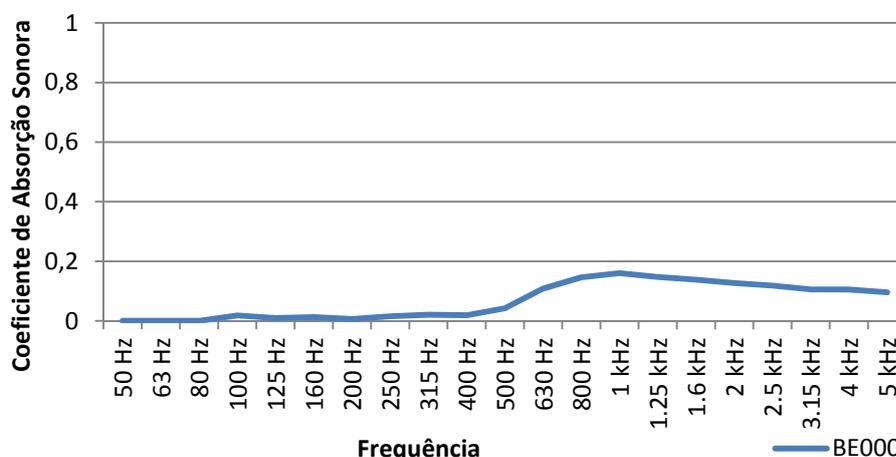


Figura 80: Coeficiente de absorção sonora de BE000 por banda de frequências obtido em ensaio ( $\alpha_s$ ).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 80 e na Tabela 14 (p. 126), o painel de bambu sem cavidade apresentou uma discreta absorção sonora, iniciando uma ascensão em 500Hz e mantendo o valor entre 0,2 e 0,1 até a frequência de 4000Hz e o coeficiente de absorção sonora máximo foi de 1,60 em 1000Hz. Dessa forma, o bambu laminado colado como revestimento, sem cavidade de ar, apresentou pouca absorção sonora, resultado esse que corroborou as expectativas para o material.

Tabela 14: Coeficiente de absorção sonora de BE000 por banda de frequências.

Coeficiente de absorção sonora de 500 - 5000Hz sem cavidade interna ( $\alpha_s$ )											
Frequência	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz
BE000	0,043	0,109	0,147	0,160	0,148	0,139	0,127	0,118	0,106	0,105	0,096

### 3.2.4. Painéis com cavidade preenchida com lã de vidro de 50mm (ensaios BEL100, BEL075 e BEL050)

Para os dispositivos do tipo membrana ressonante, existe a possibilidade de inserção de material poroso ou fibroso na cavidade interna para proporcionar a absorção sonora de uma gama de frequências maior. Assim, com a introdução desse material esperou-se uma elevação no coeficiente de absorção sonora do sistema e uma curva de absorção sonora com amplitude de frequências maior do que com a cavidade vazia, porém mantém-se o pico de ressonância do sistema. Logo, o estimativa inicial previu as mesmas frequências de ressonância do sistema com cavidade vazia, para BEL100 em 123Hz, para BEL075 em 142Hz e para BEL050 em 174Hz. Porém, os valores máximos para os coeficientes de absorção sonora mensurados foram próximos a 0,8 para BEL100, entre 0,6 e 0,8 para BEL075 e, por fim, próximo a 0,6 para BEL050. Na Figura 81 pode ser observado o gráfico de coeficiente de absorção sonora calculado pelos ensaios em laboratório.

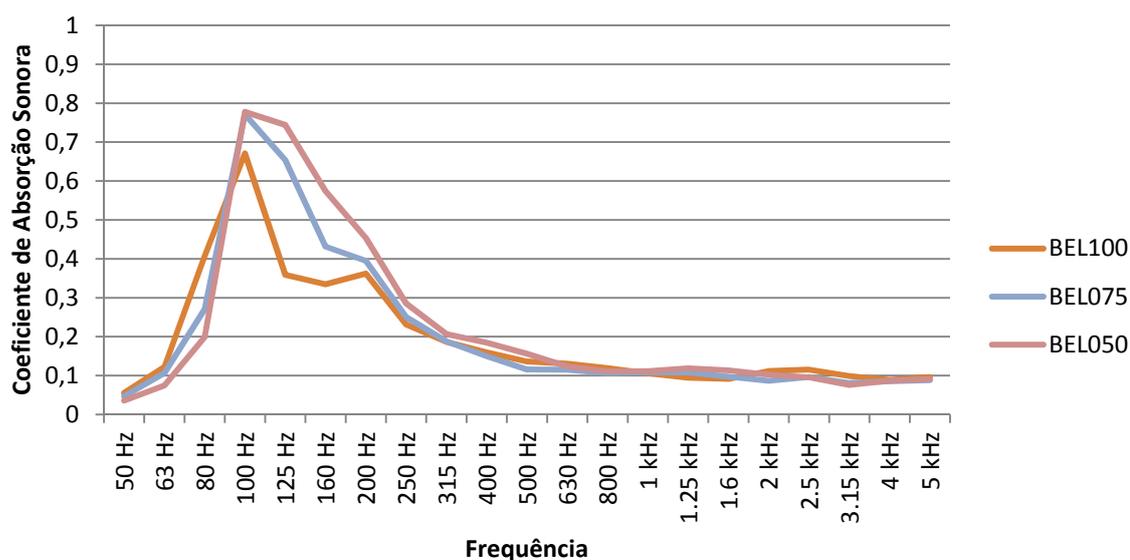


Figura 81: Coeficiente de absorção sonora de BEL100, BEL075 e BEL050 por banda de frequências ( $\alpha_s$ ).  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a análise da Figura 81, pode-se constatar que a inserção da lã na cavidade do dispositivo contribui para a elevação dos coeficientes de absorção sonora do sistema. A curva de absorção comportou-se como o esperado, com a ampliação da gama de frequências absorvidas e a apresentação de um pico menos acentuado. Contudo, a frequência de ressonância para os três ensaios se manteve em 100Hz, diferentemente do que foi previsto no cálculo. O ensaio na conformação BEL100 obteve o coeficiente de absorção sonora máximo de 0,67, porém a previsão era de um valor próximo a 0,8, enquanto que BEL075 e BEL050 obtiveram semelhante coeficiente máximo em 0,771 e 0,778 respectivamente. O ensaio BEL075 corroborou a previsão de coeficiente, entre 0,6 e 0,8, todavia, o ensaio BEL050 superou as expectativas de absorção, pois a previsão era de um valor próximo a 0,6 e obteve-se o valor de 0,778. Ainda, a absorção sonora do dispositivo aumenta bastante nas frequências mais baixas, até atingir o pico de ressonância e, em seguida, decai lentamente até a frequência de 500Hz. A Tabela 15 demonstra os valores para as frequências até 500Hz.

Tabela 15: Coeficiente de absorção sonora para BEL100, BEL075 e BEL050.

Coeficiente de absorção sonora de 50 - 500Hz para cavidade com lã de vidro de 50mm ( $\alpha_s$ )											
Frequência	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz
BEL100	0,055	0,122	0,407	0,671	0,359	0,335	0,362	0,231	0,187	0,159	0,136
BEL075	0,047	0,107	0,271	0,771	0,654	0,432	0,395	0,251	0,188	0,150	0,116
BE050	0,036	0,075	0,199	0,778	0,744	0,574	0,454	0,285	0,207	0,185	0,156

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, para os absorvedores sonoros tipo membrana ressonante com a cavidade interna preenchida com lã de vidro, a amostra com resultado de absorção superior foi a BEL050. Pois obteve um desempenho semelhante ao BEL075, mas com a introdução da lã superou as estimativas gráficas e ainda utiliza uma quantidade menor de material para sua produção. Contudo, para o ensaio BEL075 a introdução da lã não foi tão efetiva quanto nos outros ensaios, pois o coeficiente de absorção sonora máximo ensaiado para BE075, em 0,743 para 100Hz, foi próximo ao obtido com preenchimento de lã de vidro, em 0,771 para 100Hz, apesar de apresentar elevação nesses coeficientes para as frequências de 160 e 200Hz.

### 3.2.5. Lã de vidro de 50mm ensaio LAV050

Com o objetivo de comparação com as especificações do fabricante, foi executado o ensaio do coeficiente de absorção sonora para a lã de 50mm foi introduzida na cavidade interna do dispositivo tipo membrana ressonante. O ensaio foi feito com as mesmas especificações daqueles executados para a membrana ressoante. A Figura 82 apresenta os resultados do coeficiente de absorção sonora do ensaio realizado em laboratório e a previsão de acordo com as informações do fabricante.

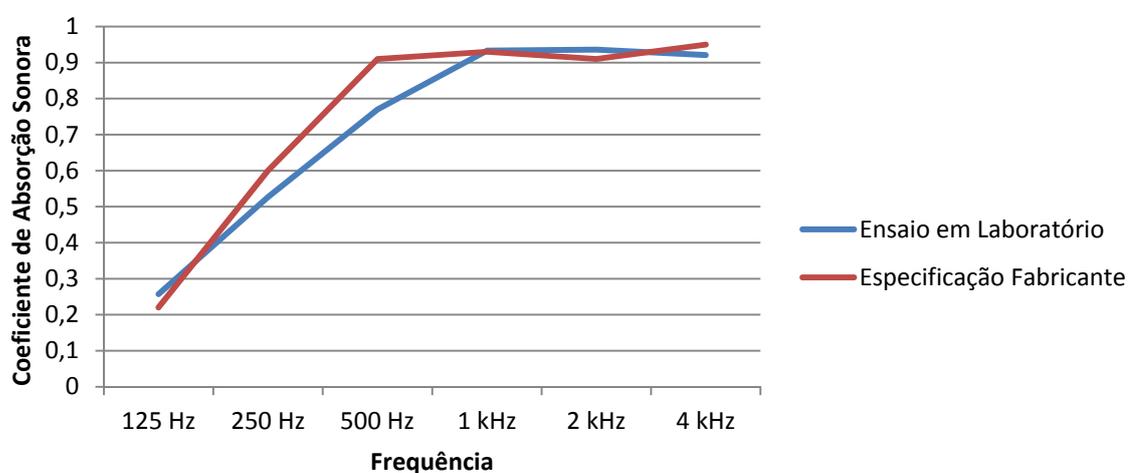


Figura 82: Comparação de coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ), laboratório x especificação do fabricante.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a lã de vidro, o resultado dos coeficientes de absorção sonora foram próximos àqueles fornecidos pelo fabricante. Apenas na frequência de 500Hz houve uma diferença maior entre os resultados, pois enquanto o fabricante especificou uma absorção de 0,91, o valor obtido em laboratório foi de 0,76. A Tabela 16 apresenta os valores dos resultados e a previsão do fabricante.

Tabela 16: Comparação do coeficiente de absorção sonora obtido no laboratório e especificação do fabricante.

Coeficiente de Absorção Sonora por Banda de Frequência ( $\alpha_s$ )						
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Fabricante	0,22	0,60	0,91	0,93	0,91	0,95
Laboratório	0,26	0,53	0,77	0,93	0,94	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, o ensaio realizado em laboratório apresenta uma gama de frequências maior do que aquele apresentado pelo fabricante em sua especificação e os dados podem ser observados na Figura 83. Dessa forma, a lã de vidro tem grande absorção para as altas frequências, de 1000Hz a 5000Hz, confirmado as expectativas para o material apresentado.

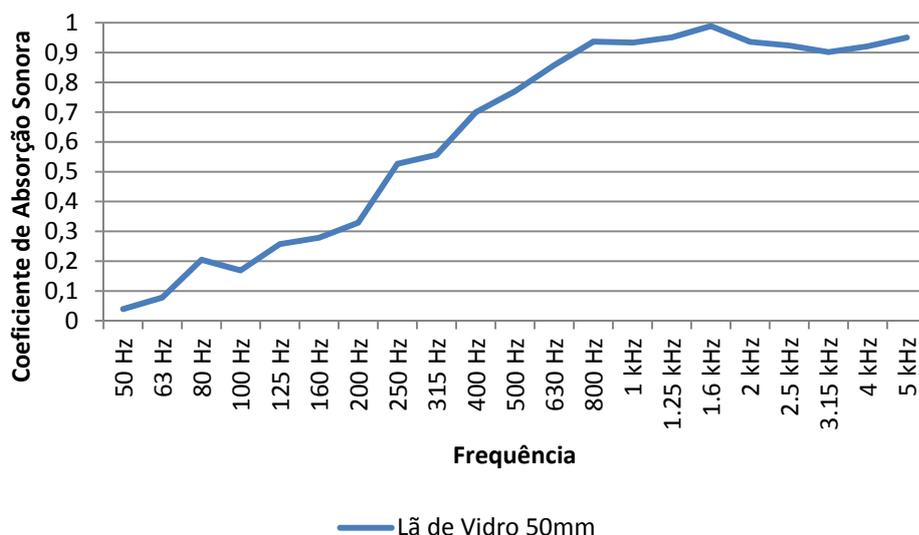


Figura 83: Coeficiente de absorção sonora calculado em laboratório ( $\alpha_s$ ).  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.6. Considerações parciais

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios em câmara reverberante, constatou-se que os protótipos de painel tipo membrana ressonante apresentaram diferentes resultados em seu coeficiente de absorção sonora para aqueles com material fibroso em sua cavidade e aqueles com o interior vazio. Logo, a diferença foi significativa, pois a lã proporcionou uma elevação nos coeficientes de absorção sonora ensaiados.

A frequência de ressonância do sistema para todas as montagens, com a membrana de BaLC no topo e o fundo lacrado com o compensado de madeira, coincidiu com o pico de absorção e manteve-se em 100Hz, ou seja, para as dimensões do absorvedor, painel com área de vibração em 1,0m x 1,0m, e para as espessuras de cavidade interna de 100, 75 e 50mm, a frequência de ressonância foi a mesma. Nos ensaios, a absorção sonora dos sistemas iniciou a partir de 63Hz, alcançando a frequência de ressonância do dispositivo e decaindo a partir de 400Hz.

O comportamento acústico dos dispositivos corroborou as premissas apresentadas na bibliografia, com relação à introdução da lã de vidro, elevando a absorção e aumentando os coeficientes de absorção sonora da gama de frequências em que o absorvedor atua. Contudo houve um desvio da previsão de comportamento do material com relação ao ensaio BE075 e BEL075, pois os resultados dos coeficientes de absorção sonora com a cavidade preenchida com lã e vazia resultaram em valores bastante próximos. Logo, essas observações demandam maiores pesquisas para se justificar esse o comportamento do dispositivo.

Já o comportamento do sistema com a lã de vidro inserida em sua cavidade apresentou o ensaio BEL050 como promissor, pois as diferenças entre o funcionamento dos elementos com cavidade de 50mm vazia e preenchida foram mais acentuados. Uma vez que seu coeficiente de absorção sonora máximo aumentou de 0,387, com a cavidade vazia, para 0,778 com a cavidade preenchida, na frequência de 100Hz, os resultados sugeriram uma melhora significativa com a inserção da lã.

Com relação ao bambu laminado colado como revestimento, sem somente a placa de BaLC sem cavidade de ar, observou-se que possui mínima absorção sonora nas altas frequências e absorção irrelevante nas baixas frequências, portanto, confirmou-se a escolha do material para a confecção do dispositivo tipo membrana ressonante, pois o material BaLC possui características mais reflexivas do que absorvedoras. Contudo, esse o resultado não invalida seu uso como revestimento, pois pode ser aliado a outros materiais para o condicionamento acústico de salas.

Portanto, a análise dos resultados proporcionou diversas conclusões com relação ao uso do material para absorção de baixas frequências, todavia, este estudo caracteriza-se como inicial, visto que este estudo do comportamento acústico do bambu laminado colado parece não ser um esforço comum. Logo, esta pesquisa propõe e avalia a possibilidade de uso e desenvolvimento do BaLC para o condicionamento acústico de forma a buscar materiais não convencionais que poderiam ter um coeficiente de absorção sonora satisfatório para dispositivos de absorção sonora de baixas frequências.

## **CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

## 4.1. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada buscou a revisão dos conceitos relacionados à acústica para definir a possibilidade do uso de um material não convencional para o condicionamento acústico de salas, o bambu em sua forma de laminado colado, com o desenvolvimento e a experimentação de um protótipo que iniciasse a definição das características acústicas do material proposto. Para tanto, a literatura revisada envolveu as principais propriedades do som e suas características para a acústica de salas e o condicionamento acústico, assim como foi apresentado o material que desejou-se introduzir os estudos sonoros.

As características anatômicas, morfológicas, propriedades químicas, físicas, mecânicas, e os aspectos ambientais relacionados à matéria prima propiciaram seu uso para condicionamento acústico na forma de laminado colado. Dentre as características do material, a resistência mecânica e suas fibras alinhadas de forma unidirecional mostraram-se pertinentes para o desenvolvimento de um painel de BaLC, semelhante ao compensado de madeira.

Tendo em vista os tipos de materiais usados para o condicionamento acústico apresentados, como os porosos e fibrosos, os ressoadores e as membranas ressonantes, percebeu-se que o estudo desse material, que mostrou-se promissor em suas características físico-mecânicas e ambientais, poderia ser estimulado pelos sistemas absorção sonora de baixas frequências. Dessa forma, a confecção do dispositivo absorvedor com painel em BaLC demonstrou ser pertinente, pois um contraplacado de fibras resistentes e unidirecionais configurou uma característica positiva para a membrana ressonante.

Os protótipos foram projetados para iniciar um estudo acústico do material, visto que não foram encontradas referências para o comportamento do BaLC como membrana ressonante. Para tanto, decidiu-se por ensaiar o coeficiente de absorção sonora do BaLC, assim como seu comportamento como dispositivo absorvedor de baixas frequências. O transporte do material, do laboratório de execução para o laboratório de ensaio, foi feito por via terrestre com o apoio da PPG/FAUUnB e foram observadas algumas dificuldades, como o volume de material e a forma em que seria transportado, pois eventuais impactos sobre a membrana poderiam criar entraves para o ensaio.

No Laboratório de acústica da EAC/UFSM foram realizados 8 ensaios, de acordo com as especificações da norma internacional ISO 354:2007, para a membrana de bambu laminado colado e 1 ensaio de absorção da lã de vidro que preencheu as cavidades em alguns dos ensaios. Os testes foram realizados em câmara reverberante com 207m<sup>3</sup> de volume e os resultados revelaram características significantes para a aplicação do BaLC como membrana ressonante. Os protótipos superaram as expectativas das estimativas calculadas e um dos ensaios demonstrou que a cavidade do dispositivo vazia foi tão eficiente quanto o mesmo dispositivo preenchido com lã, com relação ao pico de absorção sonora máximo. Assim, os resultados podem evidenciar que o próprio BaLC, em conjunto com determinada camada de ar, absorveu com eficiência determinadas frequências.

Na etapa de ensaio em laboratório também houve intensa troca de informações com pesquisadores e técnicos envolvidos na experimentação. A familiarização com os procedimentos de ensaio, a atenção voltada ao material, os equipamentos e toda a infraestrutura foram fundamentais para início do conhecimento acústico do BaLC, e firmando essa parceria do PPG-FAUUnB com a EAC/UFSM abre-se um leque de oportunidade de ambos os lados para trocas de experiência e desenvolvimento tecnológico.

Os experimentos evidenciaram que a cavidade vazia de 75mm, no ensaio BE075, obteve um máximo coeficiente de absorção sonora próximo ao maior coeficiente encontrado em todos os ensaios, logo demonstrando a capacidade da membrana de bambu aliada a camada de ar nesse sistema, e portanto, apresentou desempenho superior para a cavidade vazia, superando as estimativas calculadas. Já com o preenchimento em lã de vidro de 50mm de espessura na cavidade interna, o ensaio BEL050, com 50mm de camada de ar, apresentou um desempenho satisfatório, pois teve um coeficiente de absorção sonora máximo elevado e, se comparado com o ensaio BE050, de cavidade vazia, houve um grande variação de absorção nas frequências de 63 a 250Hz. Ainda, o BaLC como material de revestimento, o ensaio BE000, demonstrou alguma absorção, logo pode ser aliado a outros materiais para condicionamento acústico.

As frequências de ressonância para cada sistema montado com as distintas espessuras de ar em sua cavidade mantiveram-se em 100Hz e diferiram

daquelas estimadas por meio de cálculo. Esse fato demonstra a necessidade de mais pesquisas acústicas com o material para a comparação de resultados e estabelecer-se com precisão essas características obtidas em ensaio.

Portanto, a pesquisa realizada consistiu em um trabalho multidisciplinar que envolveu diversas equipes interessadas em desenvolver a tecnologia do laminado colado de bambu no Brasil e investigar o seu comportamento como possível material construtivo com absorção. De modo que o estudo apresentado uniu o esforço de pessoal técnico de marcenaria, especializados em BaLC; pessoal de apoio de laboratório em Brasília-DF e Santa Maria-RS, como os técnicos que instruíram os procedimentos laboratoriais; pesquisadores Engenheiros das áreas Florestal e Civil, como os responsáveis pelo LPF/SFM e pelo Laboratório de Acústica da EAC/UFSM, para obtenção dos resultados que foram apresentados. Assim, o bambu, em sua forma de painel laminado colado constitui uma possibilidade real e tangível para a aplicação no condicionamento acústico de salas e, também, como uma inovação tecnológica importante para a troca de conhecimentos entre universidades, de modo impulsionar novas pesquisas no país e desenvolver um ciclo de inovações tecnológicas para o material.

Com referência aos problemas encontrados durante a pesquisa, observa-se que o emprego de um material não convencional para o desenvolvimento de quaisquer dispositivos experimentais apresenta desafios a serem enfrentados e devem ser levados em conta nos futuros trabalhos relacionados com o bambu como material acústico.

Um das limitações enfrentadas foi o fornecimento de matéria-prima, pois, no Brasil, o bambu não possui uma cadeia produtiva estabelecida e seu fornecimento é artesanal. Assim, a perda de peças devido ao precário controle do material pelo produtor de bambu e a dificuldade de pessoal especializado para a coleta dos colmos apresenta-se como um entrave para sua produção industrial. Outra dificuldade está no maquinário disponível no mercado, pois o processamento das ripas é feito por máquinas utilizadas para madeira e adaptadas para o bambu. Essas limitações podem causar a perda de produção devido à necessidade de manutenção constante e troca de peças.

Com relação aos protótipos produzidos, uma limitação encontrada foi o transporte para o local de ensaio, pois cada peça pesava cerca de 15Kg e dimensões superiores a 1m, assim o percurso de Brasília-DF para Santa Maria-RS ocasionou alguns danos na placa de fundo dos painéis. Apesar de não terem influenciado na obtenção dos resultados, constituiu um fator importante para uma pesquisa futura, pois grandes distancias podem causar danos irreparáveis e inviabilizar um ensaio em laboratório.

Ainda, as dimensões das peças exigiram duas pessoas para serem desmontadas e remontadas, ocasionando um elevado de tempo de preparação, pois necessitavam serem manipuladas e constantemente desmontadas e remontadas, aumentando o tempo de ensaio no laboratório e atravancando uma exaustiva experimentação de suas características acústicas em câmara reverberante.

A obtenção de resultados positivos, que demonstraram potencial para a absorção sonora de baixas frequências, evidenciou que a aplicação do bambu laminado colado para dispositivos tipo membrana ressonante foi pertinente. O protótipo executado com características modulares de montagem e desmontagem revelou, também, que a abordagem utilizada foi satisfatória e pode ser ainda mais desenvolvida e melhorada para proporcionar a experimentação do material em outras pesquisas.

Nos resultados obtidos para medições de absorção sonora para baixas frequências existe, ainda, uma imprecisão. Apesar do volume da câmara reverberante ser de 207m<sup>3</sup>, as dimensões do recinto podem limitar a amplitude de propagação das ondas sonoras abaixo de 100Hz. Entretanto, foram feitas medições com a variação da posição do microfone e fonte sonora de forma a cumprir as exigências da norma utilizada e garantir um resultado consistente.

Por fim, esta pesquisa pode despertar o interesse de profissionais da área pelos materiais fibrosos, especialmente o BaLC, com o objetivo de a aplicação na absorção sonora e também proporcionar a divulgação e o conhecimento de suas características para diversos outros fins.

Tendo em vista os dados obtidos por esta pesquisa e embora os objetivos principais tenham sido alcançados, o presente trabalho pode servir de base para

futuras pesquisas de modo a completá-lo e avançar na caracterização acústica do material. O estudo apresentado abordou tecnicamente a produção dos painéis de BaLC, ressaltando diversos pontos importantes em sua etapa de processamento, contudo não foram abordados os custos técnico-econômicos para a produção desses protótipos.

Sugere-se, então, um estudo aprofundado sobre a viabilidade técnico-econômico que abordasse uma avaliação do custo e tempo de produção do material utilizado, levando em conta desde a capacidade dos produtores de bambu em disponibilizar sua mercadoria; a infraestrutura existente para o desenvolvimento da cadeia produtiva; os gastos energéticos, de mão-de-obra e maquinário, para se mensurar com exatidão a possibilidade de mercado do painel em BaLC, e sua aplicação na acústica.

Outro ponto interessante e que poderia ser desenvolvido é realização de mais ensaios com a variação da espessura da membrana de bambu, de modo que variando-se a espessura do material e da camada de ar na cavidade do dispositivo, poder-se-ia criar um método de estimativa gráfica específico para o BaLC, visto que as estimativas apresentadas na pesquisa tiveram por base um estudo feito sobre o comportamento da madeira.

Seria interessante, também, um estudo sobre compósitos de bambu para a substituição da lã utilizada no interior da cavidade, como a utilização da serragem da produção para a composição de um material poroso ou fibroso que obtivesse absorção sonora satisfatória nas altas frequências. Assim, o desenvolvimento do absorvedor tipo membrana ressoante em BaLC seria completamente produzido com materiais não convencionais.

Com o estudo compósitos de bambu, poder-se-ia testar as membranas perfuradas com o BaLC, de modo a constituir outro tipo de painel para absorção sonora de altas frequências. Dessa forma, o comportamento do material fibroso também estaria em contato direto com o ar do exterior e seu funcionamento poderia ser mais eficaz.

Por fim, sugere-se também um estudo aprofundado sobre os impactos ambientais positivos que a produção de materiais acústicos em bambu pode

acarretar. Pois, em geral, os materiais presentes no mercado usados para absorção de baixas frequências são os derivados da madeira, como o as chapas de compensado, OSB e MDF. Todavia, os materiais para a absorção de frequências altas são derivados recursos não renováveis, como as espumas e as lãs minerais. Assim, uma comparação entre a produção dos materiais em bambu com aqueles industriais disponíveis, com relação à toxicidade ao ser humano, meio ambiente e energia necessária para produção, dentre outros, seria pertinente para ampliar o conhecimento do BaLC.

## ANEXO I – Ensaio BE100

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

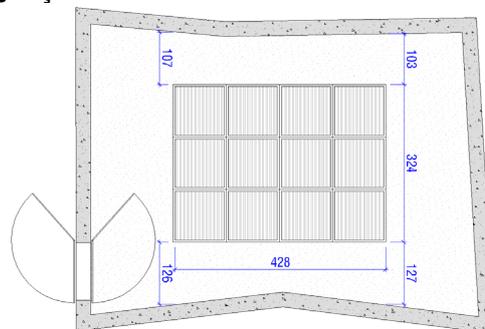
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar interna vazia de 100mm de espessura.</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,4 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	84 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	01 - 24/06/2014 - 17:39	Código do ensaio	BE100

#### Identificação do ensaio

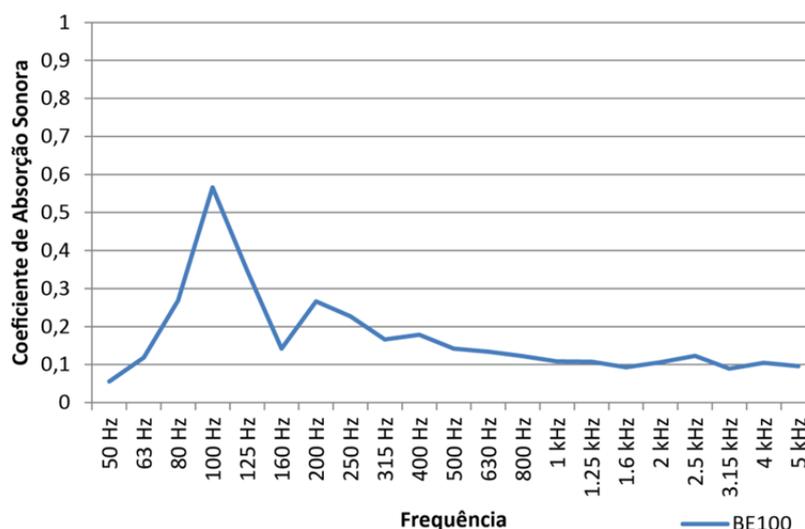


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	20,88	0,06
63	34,54	13,93	0,12
80	32,85	7,85	0,27
100	16,27	3,76	0,57
125	16,06	5,32	0,35
160	17,33	9,17	0,14
200	17	6,45	0,27
250	16,09	6,94	0,23
315	17,27	8,47	0,17
400	14,53	7,5	0,18
500	14,24	8,22	0,14
630	13,37	8,12	0,13
800	12,22	7,93	0,12
1000	10,45	7,42	0,11
1250	9,35	6,86	0,11
1600	8,74	6,75	0,09
2000	7,74	5,97	0,11
2500	6,59	5,1	0,12
3150	5,42	4,61	0,09
4000	4,55	3,88	0,11
5000	3,55	3,16	0,10



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO II – Ensaio BE075

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

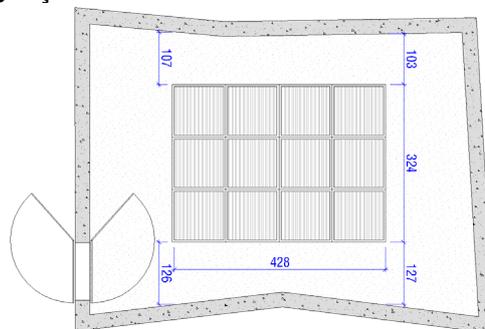
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar interna vazia de 75mm de espessura.</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	17,8 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	84 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	02 - 25/06/2014 - 9:37	Código do ensaio	BE075

#### Identificação do ensaio

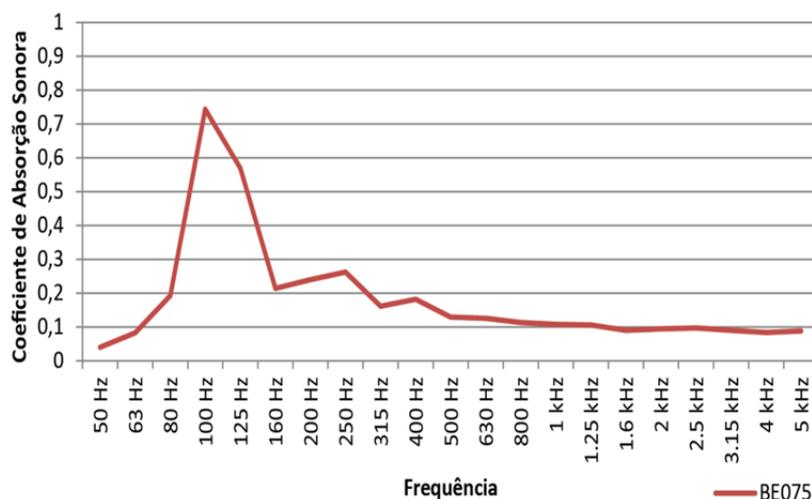


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	23,73	0,04
63	34,54	17,01	0,08
80	32,85	10	0,19
100	16,27	3,03	0,74
125	16,06	3,73	0,57
160	17,33	7,4	0,21
200	17	6,88	0,24
250	16,09	6,37	0,26
315	17,27	8,61	0,16
400	14,53	7,44	0,18
500	14,24	8,56	0,13
630	13,37	8,33	0,13
800	12,22	8,16	0,11
1000	10,45	7,42	0,11
1250	9,35	6,89	0,11
1600	8,74	6,81	0,09
2000	7,74	6,13	0,09
2500	6,59	5,35	0,10
3150	5,42	4,61	0,09
4000	4,55	4	0,08
5000	3,55	3,19	0,09



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia       $\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO III – Ensaio BE050

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

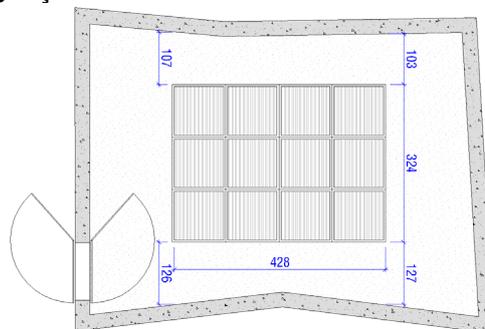
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar interna vazia de 50mm de espessura.</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,8 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	92 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	03 - 26/06/2014 – 9:44	Código do ensaio	BE050

#### Identificação do ensaio

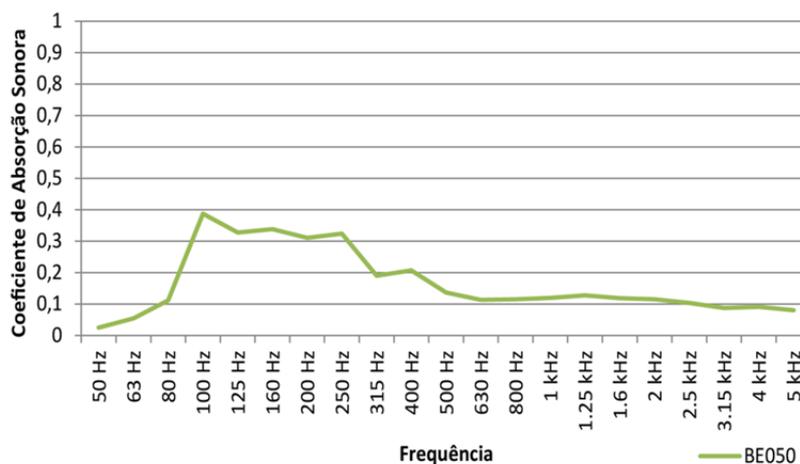


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	27,3	0,02
63	34,54	20,62	0,05
80	32,85	14,18	0,11
100	16,27	4,97	0,39
125	16,06	5,54	0,33
160	17,33	5,56	0,34
200	17	5,85	0,31
250	16,09	5,58	0,32
315	17,27	7,9	0,19
400	14,53	6,97	0,21
500	14,24	8,38	0,14
630	13,37	8,65	0,11
800	12,22	8,11	0,11
1000	10,45	7,21	0,12
1250	9,35	6,54	0,13
1600	8,74	6,36	0,12
2000	7,74	5,86	0,11
2500	6,59	5,29	0,10
3150	5,42	4,63	0,09
4000	4,55	3,96	0,09
5000	3,55	3,22	0,08



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO IV – Ensaio BE025

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

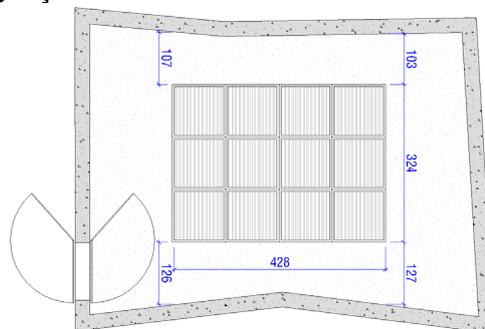
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar interna vazia de 25mm de espessura.</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,6 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	91 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	04 - 26/06/2014 - 14:28	Código do ensaio	BE025

#### Identificação do ensaio

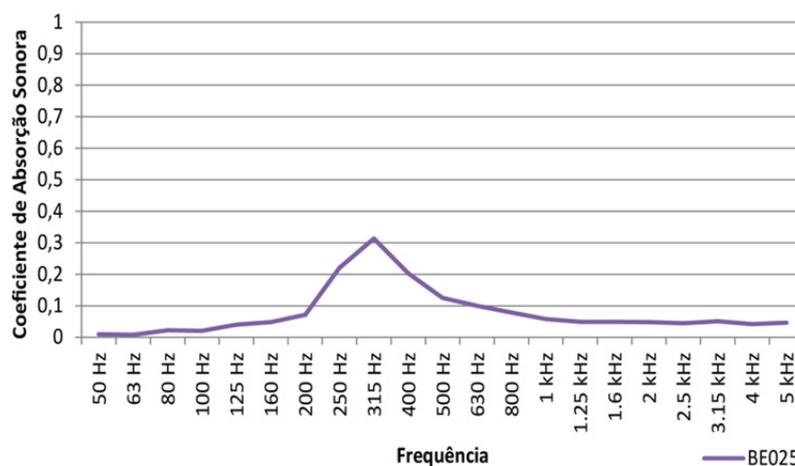


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	31,87	0,01
63	34,54	31,45	0,01
80	32,85	26,06	0,02
100	16,27	14,54	0,02
125	16,06	13,02	0,04
160	17,33	13,31	0,05
200	17	11,84	0,07
250	16,09	7,06	0,22
315	17,27	5,85	0,31
400	14,53	7,04	0,20
500	14,24	8,68	0,12
630	13,37	9,03	0,10
800	12,22	9,09	0,08
1000	10,45	8,58	0,06
1250	9,35	8,02	0,05
1600	8,74	7,58	0,05
2000	7,74	6,82	0,05
2500	6,59	5,96	0,04
3150	5,42	4,93	0,05
4000	4,55	4,26	0,04
5000	3,55	3,35	0,05



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO V – Ensaio BE000

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

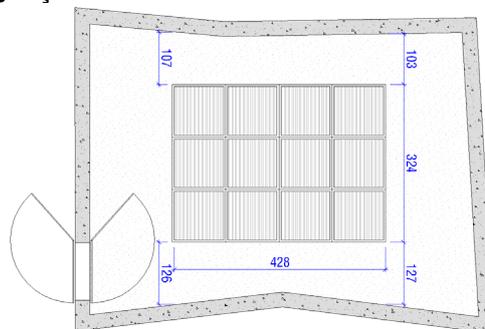
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio de absorção da membrana de BaLC, uso como material de revestimento</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,9 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	92 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	05 - 26/06/2014 - 16:12	Código do ensaio	BE000

#### Identificação do ensaio

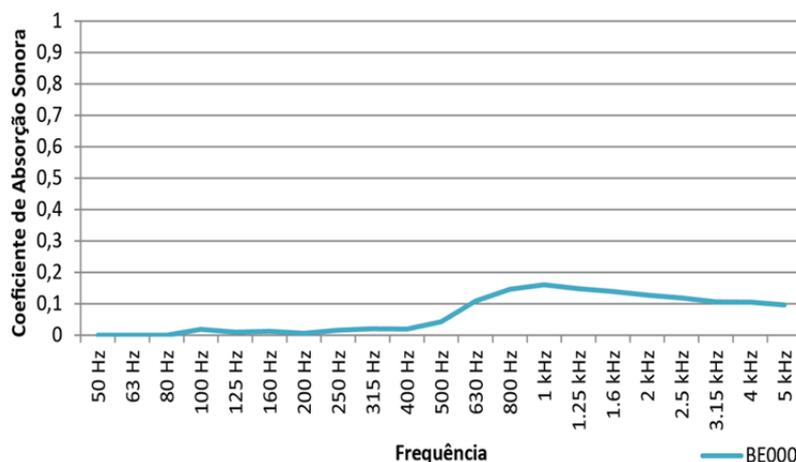


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	-	-
63	34,54	-	-
80	32,85	-	-
100	16,27	14,67	0,02
125	16,06	15,21	0,01
160	17,33	16,09	0,01
200	17	16,41	0,01
250	16,09	14,76	0,02
315	17,27	15,32	0,02
400	14,53	13,21	0,02
500	14,24	11,68	0,04
630	13,37	8,77	0,11
800	12,22	7,42	0,15
1000	10,45	6,51	0,16
1250	9,35	6,24	0,15
1600	8,74	6,08	0,14
2000	7,74	5,71	0,13
2500	6,59	5,14	0,12
3150	5,42	4,49	0,11
4000	4,55	3,88	0,11
5000	3,55	3,16	0,10



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO VI – Ensaio BEL100

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

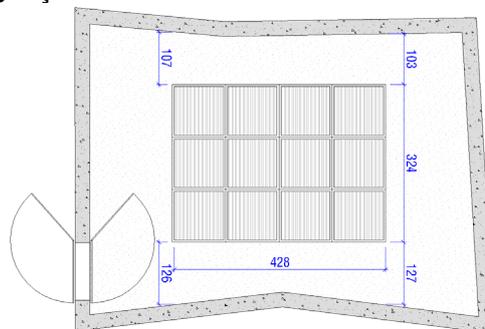
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar com 100mm de espessura e lã de vidro 50mm</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,3 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	91 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	06 - 26/06/2014 – 20:23	Código do ensaio	BEL100

#### Identificação do ensaio

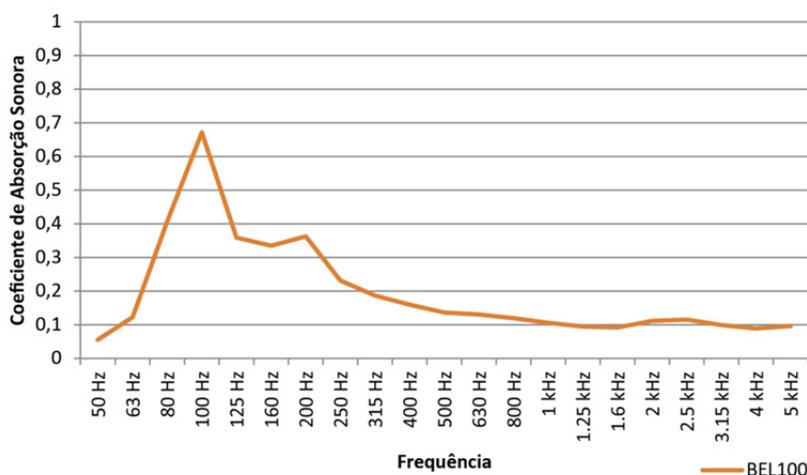


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	20,9	0,06
63	34,54	13,68	0,12
80	32,85	5,63	0,41
100	16,27	3,29	0,67
125	16,06	5,21	0,36
160	17,33	5,6	0,33
200	17	5,27	0,36
250	16,09	6,86	0,23
315	17,27	7,98	0,19
400	14,53	7,91	0,16
500	14,24	8,37	0,14
630	13,37	8,2	0,13
800	12,22	8	0,12
1000	10,45	7,47	0,11
1250	9,35	7,09	0,09
1600	8,74	6,78	0,09
2000	7,74	5,9	0,11
2500	6,59	5,17	0,12
3150	5,42	4,54	0,10
4000	4,55	3,97	0,09
5000	3,55	3,16	0,10



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO VII – Ensaio BEL075

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

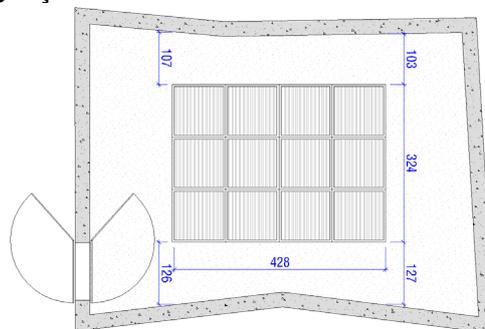
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar com 75mm de espessura e lã de vidro 50mm</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	15,1 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	90 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	07 - 27/06/2014 – 10:31	Código do ensaio	BEL075

#### Identificação do ensaio

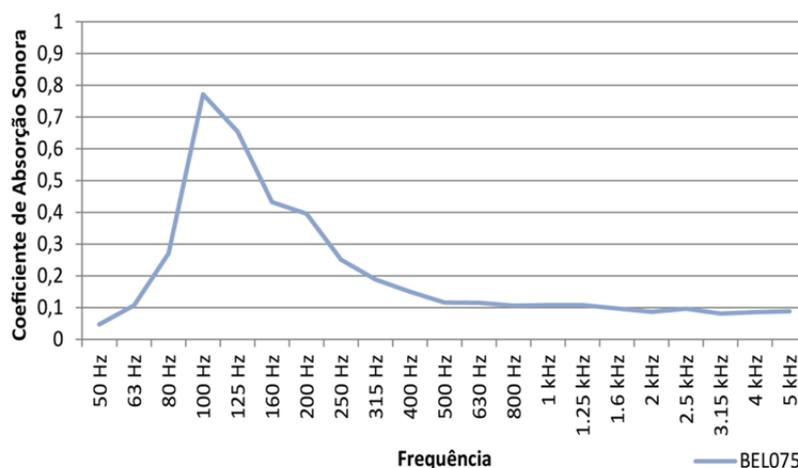


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	22,37	0,05
63	34,54	14,82	0,11
80	32,85	7,8	0,27
100	16,27	2,94	0,77
125	16,06	3,35	0,65
160	17,33	4,68	0,43
200	17	4,96	0,40
250	16,09	6,55	0,25
315	17,27	7,95	0,19
400	14,53	8,14	0,15
500	14,24	8,93	0,12
630	13,37	8,6	0,11
800	12,22	8,32	0,11
1000	10,45	7,42	0,11
1250	9,35	6,85	0,11
1600	8,74	6,69	0,10
2000	7,74	6,23	0,09
2500	6,59	5,36	0,10
3150	5,42	4,68	0,08
4000	4,55	3,99	0,09
5000	3,55	3,19	0,09



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia

$\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO VIII – Ensaio BEL050

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

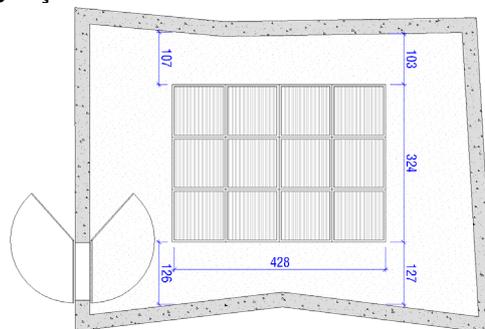
#### Especificações

Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais da Universidade de Brasília – CPAB/UnB.</b>		
Nome do produto	<b>Protótipo de Absorvedor Sonoro para Baixas Frequências</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFMS</b>		
Observações	<b>Ensaio com cavidade de ar com 50mm de espessura e lã de vidro 50mm</b>		
Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	15,4 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	88 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m <sup>3</sup>	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N <sup>o</sup> -Data-Hora	08 - 27/06/2014 – 16:46	Código do ensaio	BEL050

#### Identificação do ensaio

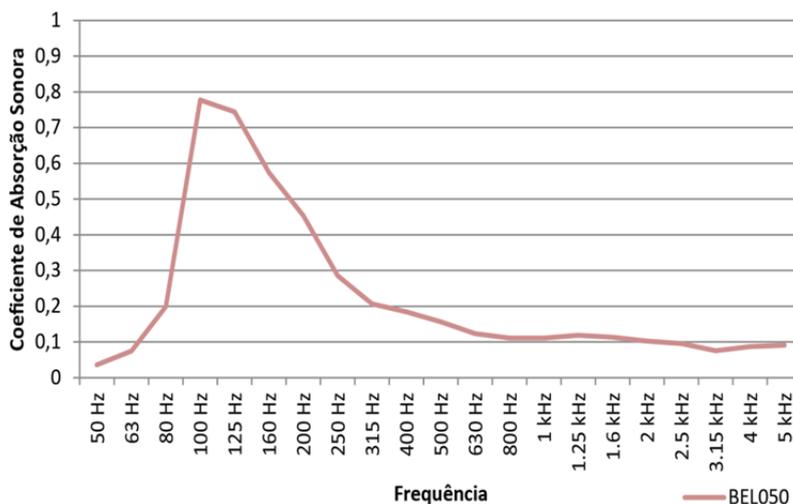


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	24,55	0,04
63	34,54	17,89	0,07
80	32,85	9,77	0,20
100	16,27	2,92	0,78
125	16,06	3,02	0,74
160	17,33	3,77	0,57
200	17	4,49	0,45
250	16,09	6,05	0,29
315	17,27	7,54	0,21
400	14,53	7,38	0,18
500	14,24	7,89	0,16
630	13,37	8,37	0,12
800	12,22	8,21	0,11
1000	10,45	7,36	0,11
1250	9,35	6,67	0,12
1600	8,74	6,44	0,11
2000	7,74	6,02	0,10
2500	6,59	5,37	0,10
3150	5,42	4,72	0,08
4000	4,55	3,98	0,09
5000	3,55	3,18	0,09



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia       $\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine

T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO IX – Ensaio LAV050

### Protocolo de medição de absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354: 2007)

#### Especificações

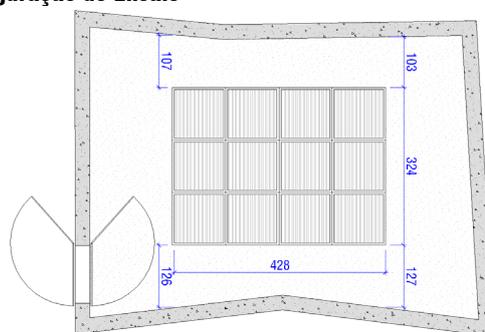
Pesquisador/Instituição	<b>Brunno Guilherme Barbosa de Sá – Universidade de Brasília</b>		
Fabricante	<b>Owens Corning</b>		
Nome do produto	<b>AISLHOGAR</b>		
Laboratório	<b>Laboratório de Engenharia acústica da EAC/UFSM</b>		
Observações	<b>Ensaio da lâ de vidro inserida na cavidade de ar dos protótipos tipo membrana ressonante em bambu laminado colado.</b>		

Set-up (ISO 354:2007)	Type A	Quant. de decaimentos	03
Temperatura	16,9 °C	Quant. de microfones	10
Umidade relativa	87 %	Quant. de fontes sonoras	02
Volume da câmara	207 m³	Sinal acústico usado	Ruído Branco
Medição N°-Data-Hora	09 - 30/06/2014 - 18:02	Código do ensaio	LAV050

#### Identificação do ensaio

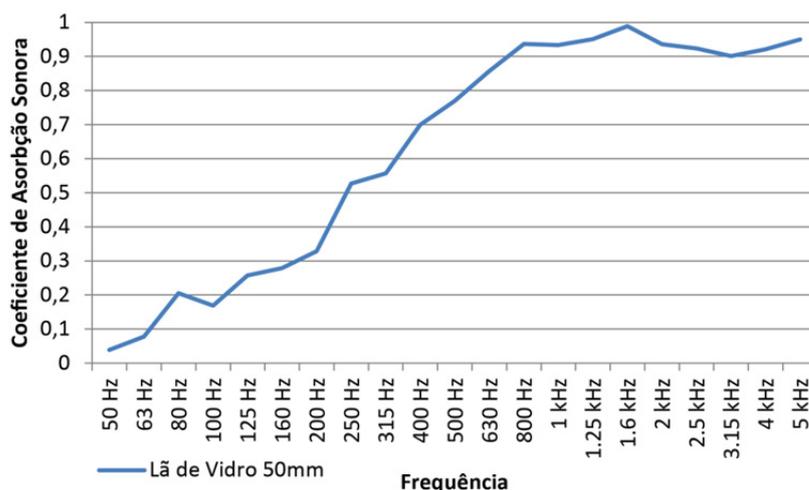


#### Configuração do Ensaio



#### Resultado das medições (ISO 354:2007)

Freq (Hz)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\alpha_s$
50	35,97	23,82	0,04
63	34,54	17,5	0,08
80	32,85	9,57	0,20
100	16,27	8,16	0,17
125	16,06	6,44	0,26
160	17,33	6,31	0,28
200	17	5,63	0,33
250	16,09	3,96	0,53
315	17,27	3,86	0,56
400	14,53	3,11	0,70
500	14,24	2,87	0,77
630	13,37	2,6	0,86
800	12,22	2,38	0,94
1000	10,45	2,31	0,93
1250	9,35	2,22	0,95
1600	8,74	2,12	0,99
2000	7,74	2,14	0,94
2500	6,59	2,06	0,92
3150	5,42	1,96	0,90
4000	4,55	1,81	0,92
5000	3,55	1,6	0,95



#### Legenda

T<sub>1</sub> = Tempo de reverberação sala vazia       $\alpha_s$  = Coeficiente de absorção Sabine  
T<sub>2</sub> = Tempo de reverberação com amostra

## ANEXO IX – Medição das espessuras do painel em BaLC

Medição das Espessuras do Painel em BaLC (Unidade: mm)								
Amostra	Espessura 1	Espessura 2	Espessura 3	Espessura 4	Espessura 5	Espessura 6	Espessura 7	Média
1	3,94	3,84	3,74	3,73	3,96	3,72	3,79	3,82
2	4,04	3,62	3,34	4,04	3,91	4,13	4,08	3,88
3	4,2	4,19	4,03	3,84	3,69	3,91	3,9	3,97
4	4,17	3,98	4,26	4,18	4,13	4,04	4,28	4,15
5	4,95	4,83	4,17	4,77	4,42	4,48	4,78	4,63
6	4,4	4,59	4,74	4,48	4,26	4,44	4,27	4,45
7	3,3	3,39	3,5	3,36	3,84	3,93	3,46	3,54
8	3,66	3,53	3,74	3,32	3,51	3,82	3,26	3,55
9	3,88	3,77	3,44	3,37	3,66	3,44	3,6	3,59
10	3,87	4,07	3,84	3,5	3,85	3,55	3,37	3,72
11	3,59	3,76	3,71	4,29	4,09	3,91	3,87	3,89
12	3,66	3,77	3,72	3,58	3,95	3,99	3,86	3,79
13	3,48	3,6	3,43	4,02	3,84	3,33	3,82	3,65
14	3,56	4,16	3,7	3,23	3,73	3,47	4,09	3,71
15	2,89	2,73	2,62	3,84	4,02	3,23	3,94	3,32
16	3,23	3,26	3,39	3,32	2,74	2,81	2,92	3,10
17	3,58	3,69	3,66	3,56	3,63	3,81	3,34	3,61
18	3,66	3,77	3,36	3,4	3,83	3,72	3,62	3,62
19	3,77	3,9	3,72	3,91	3,61	3,77	4,09	3,82
20	2,87	3,51	3,91	3,47	3	3,22	2,8	3,25
21	2,99	3,76	3,06	3,89	3,06	3,75	3,47	3,43
22	3,37	3,91	3,58	3,43	3,12	3,89	3,8	3,59
23	4,33	4,34	4,09	3,6	4,09	4,04	3,99	4,07
24	4,03	3,58	3,33	3,57	3,45	3,44	3,7	3,59
25	3,52	3,21	2,96	3,81	3,69	4,32	4,03	3,65
26	4,02	4,05	3,88	3,87	4,06	4,11	3,83	3,97
27	3,47	4,05	3,69	3,48	3,88	3,51	3,21	3,61
28	3,98	3,88	3,65	3,32	3,89	3,27	3,54	3,65
29	3,7	3,62	3,62	3,59	3,17	3,42	3,45	3,51
30	4,2	4,41	4,2	4,1	4,29	4,23	4,08	4,22
31	3,42	3,72	3,79	3,77	3,41	3,68	2,93	3,53
32	3,97	4,12	4,2	4,4	3,98	3,86	3,95	4,07
33	3,84	3,96	3,5	3,72	3,83	3,92	3,94	3,82
34	4,16	4,28	4,48	4,29	4,26	4,37	4,13	4,28
35	4,69	4,51	3,65	3,43	4,35	3,84	4,43	4,13
36	4,56	4,57	4,55	4,55	4,61	4,68	4,72	4,61
<b>Média</b>								<b>3,80</b>
<b>Desvio Padrão</b>								<b>0,35</b>
<b>Coeficiente de Variação</b>								<b>9,31644</b>
<b>Espessura Média Máxima</b>								<b>4,63</b>
<b>Espessura Média Mínima</b>								<b>3,10</b>

## ANEXO X – Especificações CASCOLA PU Monocomponente

 <b>CASCOLA PU MONOCOMPONENTE</b>	No. BT: 36-12-03 REVISÃO: 3 DATA ÚLTIMA REVISÃO: 28/12/2011
--	---

### BOLETIM TÉCNICO

Adesivo a base de pré-polímero de Poliuretano, indicado para colagens de artefatos de madeira, e outros tipos de materiais como vários plásticos e metais, sendo especialmente indicado para aplicações estruturais e à prova de água.

### ESPECIFICAÇÕES

Aspecto do Produto: Líquido viscoso, acastanhado  
Aspecto do Filme Seco: Opaco, bege, com formação de espuma quando exposto a umidade  
Densidade (20°C): 1,11 – 1,13 g/cm<sup>3</sup>  
Tempo de aplicação (UR: 50%, TA: 25°C): Max. 60 minutos  
Viscosidade Brook. RVT (20°C), cP: 7000 - 9000  
Atenção: Produto com presença de isocianato (Nocivo)

#### 1. FINALIDADE:

Adesivo mono componente que proporciona alta força de colagem (estrutural) após seco, indicado para colagens de vários tipos de substratos como: madeira, pedra, metal (como alumínio e aço) e plástico (exceto PE, PP, PTFE, PVC), sendo que, pelo menos, um dos materiais que será colado seja poroso. Especialmente indicado para colagens à prova de água fria ou fervente. Excelente para trabalhos onde a colagem será exposta temporariamente a ação das intempéries ou da água, em comprimento a norma DIN EN 204 e 205 como nível D-4. Deve ser empregado utilizando processos convencionais de colagem como prensagem a frio.

#### 2. APLICAÇÃO – PASSO A PASSO:

##### 2.1. Preparação do Substrato.

Prepare as superfícies a serem coladas, as quais devem estar limpas, planas e secas, com teor de umidade entre 9 a 15%. Necessariamente, pelo menos uma das superfícies deve ser absorvente (porosa) como madeira, gesso, concreto, etc.

##### 2.2. Aplicação do Adesivo

Aplique o adesivo com uma espátula de plástico (PE) lisa ou dentada em um dos lados da superfície a ser colada. Após aplicar o adesivo, utilizar os métodos convencionais de prensagem a frio.

##### 2.3. Pressão e Tempo de Aplicação

A pressão a ser aplicada vai depender do tipo, forma e estrutura do material a ser colado, variando assim de 0,3 a 0,5 N/mm<sup>2</sup> para madeiras de alta densidade, sendo que a força final geralmente aumenta com o aumento da pressão aplicada.

O tempo de pressão a ser aplicada irá depender do tipo do material, temperatura ambiente, da umidade das peças a serem coladas e da umidade relativa do ar. A temperatura de 25°C e umidade relativa do ar a 50%, o tempo de pressão pode variar de 3 a 5 horas (para madeiras de alta densidade), sendo que a força final será atingida após 24 horas.

#### **2.4. Tempo em Aberto**

O tempo em aberto (tempo máximo entre a aplicação do adesivo e a união das peças) vai depender da temperatura ambiente, da umidade das peças a serem coladas, da umidade relativa do ar e a quantidade de adesivo aplicado, sendo que, a temperatura de 25°C e umidade relativa do ar a 50%, o tempo máximo em aberto será de 60 minutos.

#### **2.5. Limpeza dos Materiais Utilizados**

Os materiais quando com resíduo de produto ainda úmido devera ser limpo com papel toalha. Depois de seco, deverá ser limpo mecanicamente.

### **3. RECOMENDAÇÕES:**

- Madeiras com alta quantidade de resina deverão ser limpas com acetona antes do adesivo ser aplicado.
- Para colagem de metal em madeira, principalmente quando o metal for alumínio, é necessário primeiramente lixar a peça para retirar qualquer camada de óxido.
- Para madeiras muito secas é recomendado antes de aplicar o adesivo umedecê-las levemente com um pano úmido.

### **4. RENDIMENTO:**

De 150 a 200 g/m<sup>2</sup>, aproximadamente, porém este rendimento vai depender do tipo de substratos a serem colados.

### **5. CLASSIFICAÇÃO DO ADESIVO:**

O adesivo Cascola PU classifica-se no nível de colagem D-4, conforme “EN-204 e 205”.

### **6. EMBALAGEM:**

Adesivo Cascola PU: Embalagens de 1 Kg.

### **7. PRECAUÇÕES:**

#### **INFORMAÇÕES GERAIS**

Produto contendo isocianato (nocivo), sendo assim ser manuseado em locais ventilados ou com exaustão mecânica. Em caso de manuseio por longos períodos ou em grandes quantidades, usar máscara contra gases. Proteger as mãos com luvas impermeáveis e os olhos de respingo com óculos de proteção. Em caso de reações adversas procurar auxílio médico.

### **8. ARMAZENAGEM:**

Manter o produto bem fechado, em local seco e protegido das intempéries. O produto tem vida útil de 12 meses, em condições normais de estocagem, entre 5°C e 30°C.

## **9. CLASSIFICAÇÃO PARA TRANSPORTE:**

Não é classificado como perigoso de acordo com as normas locais para transporte.

## **10. FOLHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA (FISPQ):**

A Henkel dispõe da “FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS” (FISPQ), para fornecimento, com detalhes de segurança e proteção individual, relativos à sua linha de produtos, favor entrar em contato com o nosso SAC – Serviço de Atendimento ao Cliente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Jaime G. de. *Sobre a REDEBAMBU - BRASIL*. In: Seminário Nacional para Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu – REDEBAMBU. Anais, p. 11-21. Brasília, 2006.

AZZINI, Anísio; SALGADO, Antônio Luiz de Barros. *Conservação do Bambu*. O agrônomo. vol. 46, p.01-03. Campinas, 1994.

BARBOSA, Felipe Mesquita; CUNHA, Vicente de Faria; LOURES, Thiago José Dell`Armi; ALMEIDA, Silvio Carlos Anibal de. *Produção de Carvão de Bambu: uma Alternativa Viável e Ambientalmente Sustentável*. Associação Brasileira de Análise do Ciclo de Vida, CICLA. Conferência internacional do Ciclo de Vida. São Paulo, 2007.

BERALDO, Antônio L.; CASCARDO, Cinthia R.; AZZINI, Anísio. *Avaliação do Ataque de Caruncho em Colmos e Taliscas de Bambu por Meio de Ensaio Não Destrutivo*. In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia, 2002.

BISTAFA, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. São Paulo: Bluncher, 2006.

BIES, David A.; HANSEN, Colin H. *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. Fourth Edition. Canadá: Spon Press, 2009.

BERANEK, Leo L. *Acoustics*. New York: Acoustical Society of America & American Institute of Physics, 1996.

BRASIL. *Lei Nº 12.484, de 8 de Setembro de 2011. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu – PNMCB*. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 9 de set, 2011.

CAN, Community Architects Network. *Bamboo construction source book*. Gujarat: Hunnarshala Foundation for Building Technology and innovations, 2013.

CORADIN, Vera T. Rauber; CAMARGO, José Arlete Alves; PASTORE, Tereza Cristina Monteiro; CHRISTO, Alexandre Gabriel. *Madeiras Comerciais do*

*Brasil.Chave Interativa de Identificação Baseada em Caracteres Gerais e Macroscópios*. Brasília: LPF/SFB/MMA, 2010.

CARVALHO, Régio Paniago. *Acústica Arquitetônica*. Brasília: Thesaurus, 2006.

DE MARCO, Conrado Silva. *Elementos da Acústica Arquitetônica*. 2ª Edição. São Paulo: Nobel, 1982.

DEBOER, Darrel; BAREIS, Karl. *Bamboo Building and Culture*. Paladin Press Engineering, 2000.

DELANG, Claudio O. *Bamboo Paper Production and Religious Use by the Lanten Yao in Northern Lao PDR*. Ethnobotany Research & Applications, p. 97-102. Kyoto, 2006.

DIAS, Genebaldo. *Educação ambiental: princípios e práticas*. 9ª Edição. São Paulo: Gaia, 2004.

EVEREST, F. Alton; POHLMANN, Ken. *Master Handbook of Acoustics, Fifth Edition*. United States of America: McGraw-Hill Companies, 2009.

FILGUEIRAS, Tarcísio S.; GONÇALVES, Ana Paula Santos. *Bambus nativos do Brasil: oportunidades e desafios*, 2006. In: Seminário Nacional para Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu – REDEBAMBU. Anais, p. 33-42. Brasília, 2006.

GHAVAMI, Khosrow. *Bambu: Madeira Ecológica para Habitações de Baixo Custo*. In: Seminário Nacional para Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu – REDEBAMBU. Anais, p. 111-126. Brasília, 2006.

\_\_\_\_\_, Khosrow. *Estruturas de Concreto Armado com Bambu*. CECAB – Colóquio Sobre Estrutura de Concreto Armado e Protendido. Departamento de Engenharia Civil. Vol. 1, p. 149-173. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 1990.

GANAPATHY, P.M.; HUAN-MING, Zhu; ZOOLAGUD, S.S.; TURCKE, D. ; ESPILOY, Z.B. *Bamboo Panel Boards a State-of-the-Art Review, Technical Report Nº. 12*, International Network for Bamboo and Rattan, INBAR: Eindhoven, 1999.

GERGES, Samir Nagi Yousri. *Ruído: Fundamentos e Controle*. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GRAÇA, Vera Lúcia. *Bambu: Técnicas para o Cultivo e suas Aplicações*. 2ª edição. São Paulo: Ícone, 1988.

HENRIKSON, Robert; GREENBERG David. *Bamboo Architecture in Competition and Exhibition*. Hawaii: Ronore Enterprises, 2010.

INBAR, International Network for Bamboo and Rattan. *INBAR in china and the world*. Nº 7. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004.

ISO 354:2007. *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Standard: Switzerland, 2007.

JANSSEN, Jules J. A. *Design and building with bamboo*. Technical University of Eindhoven. Netherlands: INBAR, 2000.

KIGOMO, Bernard N. *Guidelines for Growing Bamboo*. Nº 7. Nairobi: Kenya Forestry Research Institute, 2007.

KLEINLEIN, Wilhelm Abud; NOGUEIRA, Manoel F. M.; FILHO, Severiano da S. Lima; QUIRINO, Waldir F. *Caracterização Energética do Bambu*. II Seminário Nacional do Bambu. Anais, p. 72-82. Brasília: CPAB, Universidade de Brasília, 2010.

KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics*. Fifth Edition. Canadá: Spon Press, 2009.

LEGEN, Johan Van. *Manual do Arquiteto Descalço*. 4ª edição. Rio de Janeiro: Livraria do Arquiteto, 2004.

LIESE, W. *Bamboos – Biology, silvics, properties, utilization*. Agência Alemã de Cooperação Técnica (GTZ) GmbH, Eschborn: 1985.

LÓPES, Oscar Hildalgo. *Bamboo the gifts of the gods*. 1ª edição. Bogotá, Colômbia: D'vinni LTDA, 2003.

MARINHO, Nelson Potenciano; NISGOSKI, Silvana; KLOCK, Umberto; ANDRADE,

Alan Sulato de; MUÑIZ, Graciela Inês Bolzon de. *Análise Química do Bambu Gigante (Dendrocalamus giganteus wall. ex munro) em diferentes idades*. Ciência Florestal, vol. 22. , núm. 2, abril-jun, p. 417-422. Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 2012.

MELO, Júlio Eustáquio de; CAMARGOS, José Arlete Alves. *A madeira e seus usos*. 1ª Edição. Brasília: 2011.

MOIZES, Fábio Alexandre. *Painéis de bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação de Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2007.

NELSON, Bruce W.; OLIVEIRA, Átila C. de; VIDALENC, Daniela; SMITH, Maíra; NOGUEIRA, Euler M. *Florestas Dominadas por Tabocas Semi-escandentes do Gênero Guadua no Sudoeste da Amazônia*. In: Seminário Nacional para Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu – REDEBAMBU. Anais, p. 49-55. Brasília, 2006.

NEPOMUCENO, L. X. *Acústica Técnica*. São Paulo: Etegil, 1968.

NMBA, National Mission on Bamboo Applications. *Preservation of bamboo, Training Manual*. New Delhi: RSPRINTART, 2006.

OLIVEIRA, Pedro Daniel P. S. *Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Elementos Autoportantes para Absorção Sonora em Espaços Tipo Open Space*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal: 2009.

OLIVEIRA, Fernanda Mazilli. *Caracterização mecânica de espécie de bambu*. Anais ProIC 2013. Univerisidade de Brasília: Brasília, 2013.

OWENS CORNING, Fabricante. *Folder demonstrativo AISLHOGAR*. Rio Claro: Owens Corning, 2011.

PAES, Juarez Benigno; OLIVEIRA, Ana Karla Freire de; OLIVEIRA, Elisabeth de; LIMA, Carlos Roberto de. *Caracterização Físico-Mecânica do Laminado Colado de Bambu (Dendrocalamus giganteus)*. Ciência Florestal, vol. 19, n. 1, p. 41-51, jan.-mar. Santa Maria, 2009.

PEIXOTO, Luciana Kaviski. *O potencial construtivo do bambu e as vantagens do laminado colado a partir desse insumo*. In: II Seminário Nacional do Bambu. CPAB/UnB. Anais, p. 129-142. Brasília, 2011.

PEREIRA, Marco A. R.; BERALDO, Antônio Ludovico. *Bambu de corpo e alma*. Bauru: Canal 6 Projetos Editoriais, 2007.

RIVERO, Lourdes Abade. *Laminado colado e Contraplacado de Bambu*. Dissertação de Mestrado em Construções. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

SALGADO, Antônio Luiz de Barros; GODOY JR., Gentil. *O Bambu em Nossa Vida, Nossa Cultura, seu Cultivo e utilização*. In : Seminário Internacional Cursos e Mostra: O Uso do Bambu na Construção Civil. Anais, p. 40. Alagoas, 2002.

SANTOS, André Crispim dos. *Análise do Desempenho Térmico de Placa de BaLC (Bambu Laminado Colado) no Contexto do Zoneamento Bioclimático Brasileiro*. Monografia de Especialização. Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

SILVA, Pérides. *Acústica Arquitetônica & Condicionamento de Ar*. 4ª Edição. Belo Horizonte: EDTAL, Empresa Termo Acústica, 2002.

UNEP, United Nations Environment Programme. *Bamboo Biodiversity: Information for Planning Conservation and Management in the Asia-Pacific Region*. World Conservation Monitoring Centre, UNEP-WCMC/INBAR: United Kingdom, 2003.

VASCONCELLOS, Raphael Moras de. Instituto do Bambu. *Cartilha de Fabricação de Móveis em bambu*. Alagoas: INBAMBU, 2004.

VOS, Valentijn de. *Bamboo For Exterior Joinery: A research in material properties and market perspectives*. Thesis report of Larenstein University. Larensetein. BSc

International Timbertrade: University of Applied Sciences. Wageningen, 2010.

WEGST, Ulrike G.K. *Bamboo and Wood in Musical Instruments. The Annual Review of Materials Research*. Vol. 38, p. 343-349. Philadelphia: 2008.

YU, Xiaobing. *Bamboo: Structure and Culture: Utilizing bamboo in the industrial context with reference to its structural and cultural dimensions*. Doutorado. Departamento de Artes e Design da Universidade de Duisburg-Essen. Essen, 2007

ZHANG, Q.; JIANG, S.; TANG, Y. *Industrial Utilization on Bamboo*. Beijing: INBAR, 2001.

## BIBLIOGRAFIA

APARECIDA, Rosane; BATTISTELLE, Gomes; MARCILIO, Carolina; LAHR, Francisco Antônio Rocco. *Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (Saccharum officinarum) e das folhas caulinares do bambu da espécie Dendrocalamus giganteus na produção de chapas de partículas*. Minerva, Pesquisa e Tecnologia. Vol. 5(3). 2008.

ASDRUBALI, Francesco. *Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control*. Euronoise 2006. Finlandia, 2006.

BARELLI, Breno Giordano Pensa; PEREIRA, Marco Antonio dos Reis; LANDIM, Paula da Cruz. *A tecnologia na confecção de protótipos em bambu laminado colado desenvolvida na unesp-bauru*. Design, Arte e Tecnologia. São Paulo: Rosari, Universidade de Anhembi Morumbi, PUC-Rio e Unesp-Bauru, 2008.

BUCUR, Voichita. *Acoustics of Wood*. 2<sup>nd</sup> Edition. Alemanha: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

D'ALESSANDROA, Francesco; PISPOLAB, Giulio. *Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room*. RIO 2005, Internoise, Environmental Noise Control. 2005.

FARRELY, D. *The book of bamboo*. V.2. São Francisco, USA: Sierra Club Books, 1984.

GUTU, T. *A Study on the Mechanical Strength Properties of Bamboo to Enhance Its Diversification on Its Utilization*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. Volume 2. 2013.

HENG, R.B.W. *Acoustic absorption properties of materials*. Construction & Building Materials. Vol. 2. 1988.

ISBERT, Antoni Carrión. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Barcelona: Edições da Universidade Politécnica da Catalunha, 1998.

JUNG, Sung Soo; KIM, Yong Tae; LEE, Doo Hee; KIM, Ho Chul; CHO, Seung; LEE, Jong Kyu. *Sound Absorption of Micro-Perforated Panel*. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 50, No. 4, 2007.

KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. *The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers*. High Performance Structures and Composites. Southampton: WIT Press, 2002.

KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; FUJITA, K. *Performance improvement of sound-absorbing materials using natural bamboo fibers and their application*. High Performance Structures and Materials II. WIT Press, 2004.

LONG, Marshall. *Architectural Acoustics*. San Diego, USA: Elsevier Academic Press, 2006.

LUGT, Pablo van der; VOGTLÄNDER, Joost; BREZET, Han. *Bamboo, a Sustainable Solution for Western Europe Design Cases, LCAs and Land-use*. INBAR Technical Report No. 30. 2009.

OLDHAM, David J.; EGAN, Christopher A.; COOKSON, Richard D. *Sustainable acoustic absorbers from the biomass*. Applied Acoustics 72, 2011.

OLIVEIRA, Ethel Caires de; TEODORO, Elias Bitencourt. *Métodos para Medição do Coeficiente de Absorção Sonora*. 15º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica. 2005.

PATRAQUIM, Ricardo J.; PATRÍCIO, Jorge V. *Painéis acústicos de design inovador*. Acústica 2008, Universidade de Coimbra. Portugal, 2008.

RAHMAN, A.N.; NASSIR, M. H. *Effects of Physical Properties on Resonance of Natural Fibers Panel*. EURECA 2013. Taylor's University of Engineering. Anais. 2013.

RAICHEL, Daniel R. *The Science and Applications of Acoustics*. Second Edition. New York: Springer, 2006.

SANTOS, Gisele J.; BATTISTELLE, Rosane A. G.; VARUM, Humberto S. A.; FARIA, Obede Borges. *Avaliação acústica das chapas de partículas produzidas com bagaço de cana-de-açúcar e folha caulinar de bambu*. CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal, 2011.

SEDIK, Yahya; HAMDAN, Sinin; JUSOH, Ismail; HASAN, Mahbub; *Acoustic Properties of Selected Tropical Wood Species*. Springer Science & Business Media. 2010.

TSUJIUCHI, N.; KOIZUMI, T.; OHSHIMA, Y.; KITAGAWA, T. *An optimal design and application of sound-absorbing material made of exploded bamboo fibers*. Conference IMAC-XXIII: Conference & Exposition on Structural Dynamics. 2005.

WANG, Zheng; GUO, Wenjing. *Laminated Panel Manufacture of Two Kinds of Bamboo for Architecture Material and Property Comparison*. INBAR Working Paper 48. Beijing, 2003.

WASSILIEFF, Con. *Sound Absorption of Wood-Based Materials*. Applied Acoustics, Vol. 48, No. 4. Great Britain, 1996.

WEGST, Ulrike G. K. *Wood for Sound*. American Journal of Botany. Vol. 93. 2006.

WEGST, Ulrike G.K. *Bamboo and Wood in Musical Instruments*. The Annual Review of Materials Research. Vol. 38. 2008.

XIN'AN, Zhang. *Empirical Formulas of Sound Absorption Coefficients and Spectrums of Perforated Panel and imperforated Plate (diaphragm)*. Science Paper Online. Xi'an Polytechnic University. 2006.