



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL DE ABSORÇÃO  
ACÚSTICA DE COMPÓSITOS DE ARGAMASSA COM  
MATERIAIS RECICLADOS**

**FERNANDA FLACH**

São Leopoldo, Junho de 2012.

F571i

Flach, Fernanda.

Investigação do potencial de absorção acústica de compósitos de argamassa com materiais reciclados./ Fernanda Flach. – 2012.

152 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

"Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González."

1. Engenharia civil. 2. Construção civil. 3. Resíduos como material de construção. 4. Acústica. I. Título.

CDD 690

CDU 69

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)



FERNANDA FLACH

**INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL DE ABSORÇÃO  
ACÚSTICA DE COMPÓSITOS DE ARGAMASSA COM  
MATERIAIS RECICLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

**Banca examinadora:** Prof. Dr. Leandro Dalla Zen  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo, Junho de 2012.




**FERNANDA FLACH**

**“INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL DE ABSORÇÃO  
ACÚSTICA DE COMPÓSITOS DE ARGAMASSA COM  
MATERIAIS RECICLADOS”**

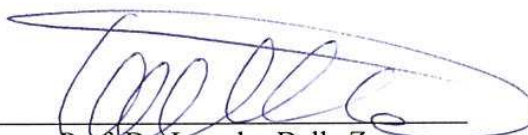
Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 22 de junho de 2012.

  
Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González  
Orientador

  
Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Leandro Dalla Zen

  
Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski



Dedico esta conquista à minha família e a todos que confiaram e acreditaram no meu potencial e torceram por mim.





## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente agradeço ao meu professor, Marco Aurélio, pela sua orientação, incentivo e dedicação.

Junto a ele, um agradecimento sincero às professoras Marlova e Feliciane.

Aos meus pais, Romeu e Rosalva, meu irmão Alexandre e meus familiares por todo amor, carinho e incentivo.

Ao meu esposo, Leandro, pela paciência, dedicação e apoio.

À Arlete, Mônica, Carine e Josiane, cuja ajuda foi muito importante, por seus conselhos e amizade sincera.

À Margaret, por sua paciência e compreensão.

À Daiana, Felipe, Maurício e Rodrigo, que em vários momentos me ajudaram a resolver dúvidas, especialmente, no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-PPGEC/UNISINOS.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, PROSUP, pela concessão da bolsa de estudos e CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

## **FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA**

Este trabalho foi realizado na Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, com incentivo da PROSUP – CAPES.



Bolsa PROSUP – Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	21
1.2	OBJETIVOS .....	23
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	23
1.2.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	23
1.3	JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DOS RESÍDUOS.....	23
1.3.1	<i>Resíduos da construção: compensado resinado.....</i>	23
1.3.2	<i>Resíduos da agroindústria: casca de arroz.....</i>	25
1.3.3	<i>Resíduos da indústria do calçado: contraforte.....</i>	26
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1	CONCEITOS BÁSICOS .....	29
2.1.1	<i>O som.....</i>	29
2.1.2	<i>Fenômenos acústicos.....</i>	35
2.1.3	<i>Absorção e isolamento acústico .....</i>	36
2.1.4	<i>Fundamentos sobre ruído.....</i>	40
2.1.5	<i>Propagação do ruído.....</i>	41
2.2	CONFORTO ACÚSTICO .....	43
2.2.1	<i>Projeto.....</i>	44
2.2.2	<i>Estudos no Brasil.....</i>	46
2.2.3	<i>Normas técnicas que abordam o conforto acústico.....</i>	47
2.3	MATERIAIS ACÚSTICOS .....	51
2.3.1	<i>Materiais convencionais para isolamento e condicionamento acústico.....</i>	51
2.3.2	<i>Isolamento do ruído com materiais não convencionais.....</i>	55
2.3.3	<i>Métodos para medição das propriedades acústicas.....</i>	64
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>93</b>
3.1	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	94
3.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	95
3.2.1	<i>Aglomerante .....</i>	95
3.2.2	<i>Agregados e resíduos.....</i>	95
3.3	PRODUÇÃO DE ARGAMASSA.....	102
3.3.1	<i>Dosagem de argamassa.....</i>	102
3.3.2	<i>Moldagem e produção dos CPs.....</i>	105
3.4	INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS ATRAVÉS DO TUBO DE IMPEDÂNCIA.....	107
3.4.1	<i>Construção e caracterização do tubo de impedância.....</i>	107
3.4.2	<i>Medição dos parâmetros acústicos e análise dos resultados .....</i>	109
3.5	PROPRIEDADES FÍSICAS AVALIADAS E MÉTODOS DE ENSAIO .....	109
3.5.1	<i>Medição da densidade aparente.....</i>	109
3.5.2	<i>Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.....</i>	110
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>113</b>
4.1	MEDIÇÕES PRELIMINARES .....	113
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE COMPENSADO RESINADO .....	113
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE CASCA DE ARROZ .....	116
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE CONTRAFORTE DE CALÇADO ...	118
4.5	ANÁLISE DO NRC DE ACORDO COM A DOSAGEM.....	120
4.5.1	<i>Comparação entre os compósitos com dosagem de 5%.....</i>	120
4.5.2	<i>Comparação entre os compósitos com dosagem de 10%.....</i>	121
4.5.3	<i>Comparação entre os compósitos com dosagem de 25%.....</i>	122
4.5.4	<i>Comparação entre os compósitos com dosagem de 50%.....</i>	123
4.5.5	<i>Considerações finais.....</i>	124
4.6	ENSAIOS FÍSICOS.....	125

4.6.1	<i>Ensaio de densidade aparente</i> .....	125
4.6.2	<i>Ensaio de Resistência à tração na flexão e à compressão</i> .....	126
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	128
4.7.1	<i>Análise de variância (ANOVA)</i> .....	129
4.7.2	<i>Regressão</i> .....	131
4.7.3	<i>Considerações sobre a análise estatística</i> .....	133
4.8	ANÁLISE ECONÔMICA.....	134
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>135</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	135
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	136
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>137</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>147</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Absorção sonora da lã de vidro, IsoSound Glass Fabrics .....	53
Tabela 2: Coeficientes de absorção da lã de rocha, IsoSound Glass Fabrics .....	54
Tabela 3: Coeficientes de absorção da espuma acústica .....	55
Tabela 4: Principais características dos tubos pesquisados na literatura.....	80
Tabela 5: Síntese dos estudos realizados pelos autores estudados .....	88
Tabela 6: Características dos materiais acústicos convencionais.....	92
Tabela 7: Caracterização dos agregados.....	98
Tabela 8: Dimensão máxima e módulo de finura dos materiais.....	101
Tabela 9: Teores de água obtidos/encontrados.....	105
Tabela 10: Dados referentes aos CPs com compensado e materiais convencionais .....	114
Tabela 11: Coeficientes de absorção acústica ponderado .....	115
Tabela 12: Dados referentes aos CPs com casca de arroz e materiais convencionais.....	116
Tabela 13: Coeficientes de absorção acústica ponderado .....	117
Tabela 14: Dados referentes aos CPs com contraforte e materiais convencionais.....	118
Tabela 15: Coeficientes de absorção acústica ponderado .....	119
Tabela 16: Tensão de ruptura de resistência à tração na flexão e compressão axial.....	126
Tabela 17: ANOVA para Teor X Tipo de resíduo .....	129
Tabela 18: Valores de relação de influência dos teores de resíduos sobre o NRC .....	130
Tabela 19: Valores de relação de influência do Tipo de resíduos sobre o NRC .....	130
Tabela 20: Valores de relação de influência Densidades Aparentes dos CPs sobre o NRC..	131
Tabela 21: Valores de relação das variáveis.....	132
Tabela 22: Levantamento de preços .....	134



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Esquema de classificação das ondas sonoras quanto à frequência.....	32
Quadro 2: Pressão sonora, intensidade e nível sonoro .....	34
Quadro 3: Características gerais dos materiais.....	37
Quadro 4: Isolamento acústico de alguns elementos construtivos .....	38
Quadro 5: Melhoria na redução de ruídos de impacto.....	45
Quadro 6: Critérios de nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado.....	50
Quadro 7: Diferença padronizada de nível ponderada entre ambientes. ....	50
Quadro 8: Caracterização dos materiais para o desenvolvimento dos experimentos.....	94
Quadro 9: Modelo experimental – combinações de espessura e teor de substituição.....	94
Quadro 10: Caracterização física e química do cimento CP IV-32.....	95





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Madeira descartada em obra .....	24
Figura 2: Destino: aterro de resíduos industriais do calçado.....	27
Figura 3: Propagação de ondas em torno de uma posição de equilíbrio. ....	30
Figura 4: Forma da onda.....	31
Figura 5: Superposição de três tons puros nas frequências $f$ , $2f$ e $3f$ .....	31
Figura 6: Curvas de igual sensação sonora (curvas isofônicas) .....	35
Figura 7: Incidência do som .....	36
Figura 8: Transmissão, absorção e reflexão do som/ruído em paredes.....	37
Figura 9: Comparação entre material absorvente e material isolante.....	39
Figura 10: Resultados de absorção sonora referentes aos materiais absorventes.....	39
Figura 11: Formas de transmissão de ruído.....	41
Figura 12: Diferentes caminhos de transmissão da energia sonora.....	42
Figura 13: Exemplo de mecanismo de isolamento de ruído de impacto .....	46
Figura 14: Estrutura de materiais acústicos .....	52
Figura 15: Lã de vidro .....	53
Figura 16: Feltro de lã de rocha.....	54
Figura 17: Imagem ilustrativa.....	55
Figura 18: Microfotografia eletrônica do lenho. ....	58
Figura 19: Micrografia da casca de arroz .....	61
Figura 20: Contraforte de calçado .....	62
Figura 21: Contraforte termoplástico .....	63
Figura 22: Contraforte termoplástico .....	63
Figura 23: Câmara reverberante .....	66
Figura 24: Exemplo de aplicação com a aquisição simultânea de níveis sonoros .....	66
Figura 25: Fonte de ruído aéreo onidirecional.....	67
Figura 26: Conjunto de equipamentos de ensaio.....	68
Figura 27: Detalhe das medições “ <i>in situ</i> ” .....	69
Figura 28: Determinação do coeficiente de isolamento acústico .....	70
Figura 29: Esquema de configuração de teste para ensaios “ <i>in situ</i> ”. .....	70
Figura 30: Máquina geradora de ruído de impacto – Padrão ISO 140-7.....	71
Figura 31: Tubo de impedância acústica .....	71
Figura 32: Representação esquemática do tubo com.....	72
Figura 33: Esquema para medição da impedância acústica .....	73
Figura 34: Tubo de impedância acústica fabricado pela Brüel e Kjaer. Modelo 4206 .....	75
Figura 35: Tubos de impedância construídos .....	75
Figura 36: Tubo de impedância construído pela Universidade de Coimbra, Portugal.....	75
Figura 37: Painéis .....	76
Figura 38: Amostra dos materiais empregados nos testes acústicos .....	77
Figura 39: Fluxograma da metodologia de pesquisa .....	93
Figura 40: Resíduo das placas de compensado de madeira.....	96
Figura 41: Moinho de facas, Resíduo de compensado de madeira .....	97
Figura 42: Resíduo de contraforte termoplástico impregnado .....	97
Figura 43: Casca de arroz .....	98
Figura 44: Análise visual da forma dos grãos da areia e das partículas dos resíduos .....	99
Figura 45: Distribuição granulométrica da areia e dos resíduos, fração retida .....	101
Figura 46: Curva granulométrica da areia e dos resíduos, massa acumulada .....	101
Figura 47: Exemplo de compensado resinado.....	102

Figura 48: Produção de argamassa.....	103
Figura 49: Moldagem do ensaio de índice de consistência.....	104
Figura 50: Moldagem do ensaio de índice de consistência.....	104
Figura 51: Moldagem dos CPs.....	105
Figura 52: Cura dos CPs .....	106
Figura 53: Configuração dos CPs .....	107
Figura 54: Tubo de impedância utilizado .....	107
Figura 55: Equipamento de aquisição de dados.....	108
Figura 56: Detalhe do posicionamento do microfone no tubo de impedância.....	108
Figura 57: Porta-amostra.....	109
Figura 58: Configuração dos CPs para ensaios de resistência .....	110
Figura 59: Conformação dos CPs analisados no ensaio de resistência.....	111
Figura 60: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	114
Figura 61: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	117
Figura 62: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	119
Figura 63: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	121
Figura 64: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	122
Figura 65: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	123
Figura 66: Resultados de coeficiente de absorção sonora.....	124
Figura 67: Gráfico de densidade aparente dos compósitos com e sem resíduo.....	125
Figura 68: Conformação dos CPs analisados após ensaio de tração à flexão.....	127

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APO - Avaliação Pós-Ocupação

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CPs – Corpos de prova

CRDR - Câmara Reverberante de Dimensões Reduzidas

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBTeC – Instituto Brasileiro de Tecnologia do Couro, Calçado e Artefatos

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO - *International Standardization Organization*

NC - Nível de Curvas de Avaliação do Ruído

NBR – Norma Brasileira

NRC – Coeficiente de Absorção Sonora Ponderado

PPGEC - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil

RCD - Resíduo de Construção e de Demolição



## RESUMO

FLACH, F. **Investigação do potencial de absorção acústica de compósitos de argamassa com materiais reciclados**. São Leopoldo, 2012. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo.

As atividades de produção, manutenção e operação do ambiente construído estão relacionadas com, aproximadamente, metade das exigências de extração e produção de materiais naturais, bem como similar parcela dos resíduos gerados pela sociedade. A construção civil está vivenciando a alteração de alguns paradigmas, com a inclusão dos requisitos de desempenho no processo de projeto, sendo um dos elementos importantes, o conforto acústico. As soluções convencionais têm custos elevados. O objetivo do trabalho é investigar o potencial de absorção acústica de compósitos de argamassa com substituição parcial da areia por alguns resíduos: da agroindústria (casca de arroz), da indústria de calçados (contraforte de calçados) e da construção (compensado resinado). Foram investigados vários teores de resíduos (0%, 5%, 10%, 25% e 50%). A medição da absorção acústica foi efetuada através de tubo de impedância, com amostras de Ø100mm. Os resultados demonstraram que os compósitos com adição de resíduos apresentaram coeficientes de absorção acústica superiores aos corpos de prova de referência, aumentando a capacidade isolante desses compósitos. A casca de arroz se destacou entre os resíduos, seguida do compensado resinado e do contraforte. Visto que não há custos significativos para incorporação destes resíduos, pode-se concluir que os objetivos foram atingidos e que este estudo contribui para a melhoria do conforto acústico e para a redução do impacto dos resíduos no meio ambiente.

Palavras-chave: Construção civil; resíduos; conforto acústico; tubo de impedância.



## ABSTRACT

FLACH, F. **Investigation of the acoustic absorption potential of the mortar composites with recycling materials.** São Leopoldo, 2012. 152 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo, Brasil.

Production the activities of, maintenance and operation of the built environment are related to approximately half of the requirements for extraction and production of materials as well as similar proportion of raw waste generated by society. The construction industry is changes experiencing some paradigms, with the inclusion of performance requirements in the design process. One of them is the acoustical comfort. The objective of this study is to investigate the potential of acoustic insulation composites of mortar with replacement of sand for a few residues: agro-industry (rice husk), shoe industry (shoes' foothills) and construction (forms of plywood). It was investigated some residues taxes (0%, 5%, 10%, 25%, 50%). The measurement of the acoustic absorption was carried out through the method using an impedance tube with sample size of Ø100mm. The results show that the compounds with the addition of wastes have higher sound absorption coefficients than the test was the best references, increasing the absorption capacity of these compounds. The rice husk was the best among the residuals, followed by the plywood waste and by of shoes' foothills. Since there is no cost for incorporation of these residues, it can be concluded that the objectives have been achieved and that this study has contributed to improving the acoustic comfort and for the reduction of the impact of residues on the environment.

Key-words: Construction, Waste, Acoustic comfort, Tube impedance.





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O recente desenvolvimento da construção civil tem transformado o mercado consumidor, exigindo que as empresas se ajustem a novos prazos de entrega, planos de desenvolvimento de produtos e de gerenciamento de projetos e obras. Também está impulsionando alterações tecnológicas dos componentes, materiais, técnicas e métodos de construção permitindo uma diminuição nos custos das edificações. Ademais, novos materiais e sistemas construtivos estão sendo desenvolvidos em pesquisas, com o objetivo de possibilitar o aproveitamento de resíduos e, assim, diminuir os danos ao meio ambiente (BORGES, SABBATINI, 2008).

Uma das alterações é a consideração do desempenho como critério de projeto. A norma brasileira de desempenho de edificações, (ABNT-NBR 15.575: 2010), estabelece critérios de adequação da construção, enfatizando a vida útil e a durabilidade dos sistemas. A qualidade de vida do ser humano é obtida através de condições mínimas de conforto. Segundo esta norma de desempenho, estas características devem ser alcançadas pelo edifício quando submetido a condições normais de uso, observando-se a necessidade da correta utilização dos materiais, para evitar retrabalho, geração de resíduos da construção civil (RCC) e consumo em excesso de matéria-prima (ABNT, 2010).

Entre os requisitos de desempenho, destaca-se a qualidade ambiental (ou conforto ambiental) dos espaços edificados, um requisito de grande importância, pois pode influenciar na qualidade de vida, no sono e nas relações entre os usuários de um mesmo edifício. O conforto ambiental é geralmente analisado sob o ponto de vista lumínico, térmico e acústico.

Pode-se definir conforto acústico como sendo a ausência de ruídos, isto é, de sons indesejados, tendo como finalidade o bem-estar das pessoas e a inteligibilidade da fala, adequando qualidade aos ambientes para oferecer sensações de conforto no trabalho, descanso e lazer (GERGES, 2000). A exposição ao ruído por longos períodos, como os ruídos aéreos e os ruídos de impacto em pisos nas edificações, pode provocar efeitos colaterais, tais como interferência no desempenho de tarefas e problemas de saúde: irritabilidade, hipertensão, dores de cabeça, insônia, estresse (FERRAZ, 2008)

Do ponto de vista dos profissionais (arquitetos e engenheiros), a acústica nas edificações deve levar em consideração o planejamento urbano e a construção de edificações

com suas instalações. Em cada um deles, há fases distintas: projeto e execução. Na etapa de projeto, as soluções em acústica são mais fáceis e econômicas de resolver. Segundo Akkerman (2010), o desenvolvimento de um bom projeto e o uso de materiais com melhor desempenho é essencial para proporcionar o conforto acústico. Após a conclusão da obra, as alterações são difíceis e de alto custo.

Alguns estudos demonstram que as edificações brasileiras convencionais têm baixo isolamento acústico (VIANNA; ROMERO, 2002; LOSSO; VIVEIROS, 2004; DUARTE; VIVEIROS, 2007; POLLI; VIVEIROS, 2007;). As soluções convencionais envolvem a aplicação de materiais com boa capacidade de isolamento, ou aumento da espessura das lajes e paredes, com a colocação de mantas ou placas isolantes, adição de materiais para absorção acústica aos contrapisos ou nos revestimentos de forro. Porém os materiais convencionais são caros (Estes materiais têm custos altos, da ordem de R\$ 22,00/m<sup>2</sup>). A correção após a construção é inviável economicamente, e mesmo a ampliação do isolamento na fase de projeto é difícil, em função dos custos dos materiais disponíveis comercialmente (CARVALHO, 2011).

Os materiais convencionais para absorção acústica, relativo à transmissão de ruído, disponíveis no mercado, são constituídos de fibras, como a lã de vidro e a lã de rocha, ou porosos, como espumas de poliuretano e poliestireno (OLIVEIRA, 2010).

Porém, existem estudos recentes que demonstram também o potencial de resíduos ou materiais não convencionais como absorvedores acústicos. Dentre vários estudos, podem ser citados trabalhos que investigam fibras vegetais, como de banana e de coco, e resíduos de alumínio (MAFRA et al., 2005; RAMIS et al., 2010; RICO et al., 2009; SANCHÍS, 2008; SILVA et al., 2008). Em geral, percebe-se que um dos determinantes na escolha dos resíduos a serem estudados é a disponibilidade na região. Alguns resíduos já foram investigados como materiais de construção, com verificação das propriedades mecânicas e químicas, mas sem a investigação das propriedades acústicas. Por exemplo, na UNISINOS, têm sido investigados alguns resíduos, tais como contraforte de calçados, cinza de casca de arroz e resíduos de britagem de concreto, para produção de concretos e argamassas (EVALDT, 2011; GONÇALVES, 2011; KAZMIERCZAK et al., 2000; KAZMIERCZAK et al., 2003; KERN et al., 2000; KRÜG, 2011; TROIAN et al., 2010; WERLE et al., 2010).

Com base nos trabalhos citados, os resíduos selecionados para estudo nesta pesquisa são: casca de arroz, contraforte de calçado e compensado resinado. O critério de seleção levou em conta a disponibilidade destes resíduos na região e a experiência em

pesquisas anteriores dentro do PPGEC/UNISINOS, aproveitando os esforços de caracterização e análise do comportamento quanto a outros aspectos.

Considerando estes elementos, a questão de pesquisa proposta é:

*Resíduos da indústria do calçado, da construção e da agroindústria podem ser utilizados na produção de materiais com potencial de absorção acústica?*

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral da pesquisa é investigar o potencial acústico de compósitos com adição de resíduos de compensado resinado, de casca de arroz e resíduos de contraforte de calçado.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Investigar a absorção acústica de compósitos de argamassa com adição de diferentes percentuais dos resíduos em estudo;
- Comparar os resultados com os de materiais convencionais (lã de vidro e espuma acústica).

## **1.3 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DOS RESÍDUOS**

A seguir serão demonstrados dados referentes à problemática dos resíduos de compensado resinado, casca de arroz e contraforte de calçado, evidenciando seu impacto no meio ambiente e a importância de sua reutilização e reciclagem.

### **1.3.1 Resíduos da construção: compensado resinado**

Com base nos dados de Pulselli et al. (2007), a indústria da construção civil emite alta concentração de CO<sub>2</sub>, além de ser responsável pela extração de 30 a 40% de todos os recursos naturais e outros 50% de rejeitos produzidos no mundo.

O uso de madeira na construção está relacionado a dois impactos ambientais: alto consumo de recursos naturais, muitas vezes de florestas incorretamente manejadas, o que impede a sustentabilidade do ecossistema (ZORDAN, 1997) e geração de resíduos em grande quantidade, reduzindo a biodiversidade e contaminando o solo (MOSMANN, 2011). Uma

pesquisa, realizada na cidade de Erechim, RS, verificou que 17% dos resíduos em um aterro industrial correspondiam ao descarte de diferentes tipos de madeiras (FARESIN; MELO, 2009).

As madeiras utilizadas em formas para as fundações e estruturas das edificações são 80% descartadas, restando apenas 20% que são reutilizadas nos acabamentos das construções, o que indica um grande desperdício desse material (INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DA AMAZONIA, 2010; MOSSMANN, 2011) (Figura 1).



**Figura 1: Madeira descartada em obra**

Fonte: Mossmann (2011)

Atualmente as chapas de madeira compensada estão substituindo a madeira natural, o que possibilitou trabalhar com maiores vãos e valores de resistência para as formas de madeira (MOSSMANN, 2011). Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente - ABIMCI (2012), o volume produzido de compensado de *Pinus*, em 2007, alcançou quase dois milhões de m<sup>3</sup>, sendo 23% destinado para o mercado interno (451mil m<sup>3</sup>), onde parte disto é para indústria moveleira, e o restante destinado para exportação.

De acordo com César et al. (2009), 70% da madeira já utilizada na construção civil está contaminada pela presença de pregos, concreto ou pintura. Quando pintada, a madeira pode vir a apresentar risco ao meio ambiente. A descontaminação torna-se necessária para o seu reuso (através de lixação e limpeza) o que não ocorre na maioria das construtoras, preferindo estas o simples descarte, pois se torna menos oneroso (MOSSMANN, 2011).

Baseado nessas informações, observa-se a necessidade de estudos e aprimoramento tecnológico para reutilizar a madeira descartada, incorporando-a novamente na construção civil.

### 1.3.2 Resíduos da agroindústria: casca de arroz

A utilização de resíduos agroindustriais vem demonstrando um grande potencial de aplicação na área da construção civil, principalmente para a produção de concreto, exigindo uma avaliação nos aspectos econômicos como também, aspectos tecnológicos (MILANI, 2008). Além disso, o uso de resíduos em concretos busca a redução do consumo de cimento para diminuição de custos e melhor aproveitamento de resíduos industriais para redução da poluição ambiental (PAULESKI, 2005).

A casca de arroz vem se destacando entre os resíduos agroindustriais no Rio Grande do Sul, pois se apresenta em quantidade suficiente para justificar o desenvolvimento de sistema de manuseio, processamento e transporte deste resíduo. Considera-se a casca de arroz como um subproduto da produção de arroz (WILLIAMS E NUGRANAD, 2000 apud KIELING, 2009).

Através de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), observa-se que o Brasil produziu 11,3 milhões de toneladas de arroz em casca no ano de 2010, sendo que a produção mundial foi de 520 milhões de toneladas. Segundo Amick (1982), apud Kieling (2009), a casca de arroz representa cerca de 20% do grão. Esse valor é de grande importância e ocasiona problemas de condicionamento final desse resíduo, sem mencionar os problemas pertinentes ao meio ambiente.

A casca de arroz é compatível para ser utilizado como combustível industrial. Sua combustão pode ser usada para a produção de vapor para a parboilização do arroz (MAYER et al., 2007) ou para geração de eletricidade. Conforme Kieling (2009) a geração de energia através da combustão da casca de arroz permite que surjam projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), pela produção de energia através de fontes renováveis, diminuindo, assim, as queimadas a céu aberto e disposição inadequada no meio ambiente, que eram comuns há alguns anos. A combustão produz como resíduo a cinza de casca de arroz, cuja disposição pode ser destinada à substituição parcial do cimento em concretos, devido ao seu alto teor de sílica. Porém a casca de arroz pode ser utilizada diretamente na construção civil, como mostram Beraldo e Tojal (2001), Pauleski (2005), Zucco e Beraldo (2008).

Beraldo e Tojal (2001) utilizaram casca de arroz em substituição ao agregado mineral miúdo na argamassa de cimento, em moradias populares na cidade de Paulínea, São Paulo, para a obtenção de blocos vazados e confecção de pisos. Já Pauleski (2005) avaliou a viabilidade do uso de casca de arroz e de partículas de madeira para a fabricação de painéis,

tendo como agente ligante o polietileno de alta densidade (PEAD). E por fim, Zucco e Beraldo (2008) estudaram o efeito da adição de cinza de casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz, que podem ser utilizados na obtenção de materiais alternativos para a construção civil.

### **1.3.3 Resíduos da indústria do calçado: contraforte**

Anualmente são fabricados no mundo em torno de 14 bilhões de pares de calçados, sendo o Brasil responsável por cerca de 800 milhões de pares. Destes, aproximadamente 620 milhões são destinados ao mercado interno brasileiro. O Rio Grande do Sul é um dos principais Polos Calçadistas do Brasil, possuindo 2762 empresas, que representam 110.766 empregos, sendo responsável por 30% das exportações brasileiras. Na região do Vale do Rio dos Sinos concentra-se grande parte da produção calçadista do estado (ABICALÇADOS, 2011).

Conforme dados da FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental), órgão responsável pelo meio ambiente no Rio Grande do Sul, o impacto ambiental causado pela cadeia produtiva do setor coureiro-calçadista atinge grandes proporções, sendo esta área, a maior geradora de resíduo sólido industrial perigoso no estado (RODRIGUES, 2009). A região do Vale do Rio dos Sinos é responsável por cerca de 65 % da produção e dos resíduos da indústria calçadista do estado, e o volume de resíduo de contraforte chegava a 80 t/ mês em 1999, correspondendo a um volume de 550 m<sup>3</sup>/mês (INSTITUTO BRASILEIRO DO COURO, CALÇADOS E ARTEFATOS, 1994 apud KAZMIERCZAK et al., 2003). Atualmente, não há dados sobre a quantidade gerada deste resíduo, mas sabe-se que a indústria calçadista teve uma diminuição considerável em sua produção, devido a problemas cambiais e econômicos, porém ainda mantém um grande potencial de produção e, conseqüentemente, geração de resíduos (Figura 2).



**Figura 2: Destino: aterro de resíduos industriais do calçado localizado na Região do Vale do Sinos, RS.**

Fonte: Kazmierczak et al. (2003)

Portanto, a reciclagem do resíduo gerado pela indústria coureiro-calçadista, através da incorporação deste resíduo em matrizes, também é de grande importância para a preservação do meio ambiente.

#### **1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Neste trabalho, optou-se pela matriz cimentícia pelo seu amplo potencial de uso. As argamassas são utilizadas em obras convencionais como base para assentamento de alvenaria, reboco, revestimentos de forro e contrapiso. Porém, a análise detalhada e definição precisa do tipo de aplicação não foram realizadas neste trabalho.

Ademais, embora reconhecidamente importantes, também não foram investigados parâmetros como trabalhabilidade, resistência ao arrancamento, durabilidade, entre outros elementos, pois por tratar-se de um primeiro trabalho, o objetivo foi avaliar qual seria o comportamento de compósitos na absorção de ruídos. A partir desses resultados, a continuidade será naturalmente efetuada abvensendo os itens excluídos.

O trabalho é um estudo exploratório, onde foi analisado um único traço de argamassa de referência, pois neste momento o foco é investigar a contribuição dos resíduos citados na absorção acústica.





## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Inicialmente, é apresentado um resumo sobre os conceitos mais importantes de acústica, seguido de fundamentos sobre ruído, para possibilitar a compreensão da seqüência da pesquisa. Em seqüência é apresentada uma visão geral sobre o conforto acústico em edificações, com ênfase em soluções projetuais, estudos existentes no Brasil e normas técnicas, explorando a importância de seu cumprimento para a construção de edificações mais eficientes. Conceitos referentes a compósitos, a diferença entre materiais absorvedores fibrosos e porosos serão também apresentados, explorando elementos construtivos, com destaque aos fundamentos e propriedades usados na confecção dos novos compósitos, incluindo a análise de suas potencialidades e meios de medição para caracterizá-los através da absorção sonora.

### **2.1 CONCEITOS BÁSICOS**

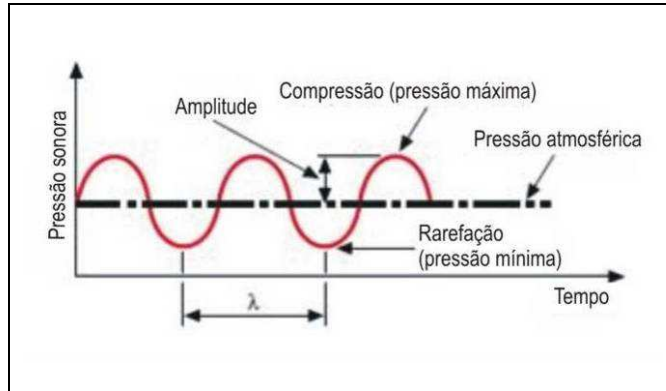
A acústica é a ciência que estuda as manifestações do som. Quando se analisam as propriedades acústicas dos materiais, levam-se em consideração reflexão, absorção e transmissão do som pelos materiais.

#### **2.1.1 O som**

O som é uma manifestação ondulatória e caracteriza-se por flutuações de pressão em um determinado meio, podendo também ser considerado como toda vibração ou onda mecânica que se propaga num meio determinado, capaz de produzir no homem uma sensação auditiva (ABNT, 1992).

A propagação do som pode acontecer através de um meio elástico ou sólido. O ar representa o meio elástico mais comum para a propagação do som, onde as colisões entre as moléculas originam regiões de compressão e rarefação no meio de propagação, não ocorrendo movimentação de matéria, apenas propagação da onda sonora. No meio sólido, o som se propaga pelas vibrações das moléculas dos materiais, por exemplo, nas paredes e lajes de uma edificação (GERGES, 2000).

As ondas sonoras propagam-se através da vibração das partículas, em função da diferença de pressão entre a fonte emissora e a fonte receptora do meio, em torno de uma posição de equilíbrio, conforme representado na Figura 3 (SILVA, 2005).



**Figura 3: Propagação de ondas em torno de uma posição de equilíbrio.**

Fonte: Silva (2005)

O comprimento de um ciclo é chamado de comprimento de onda ( $\lambda$ ).

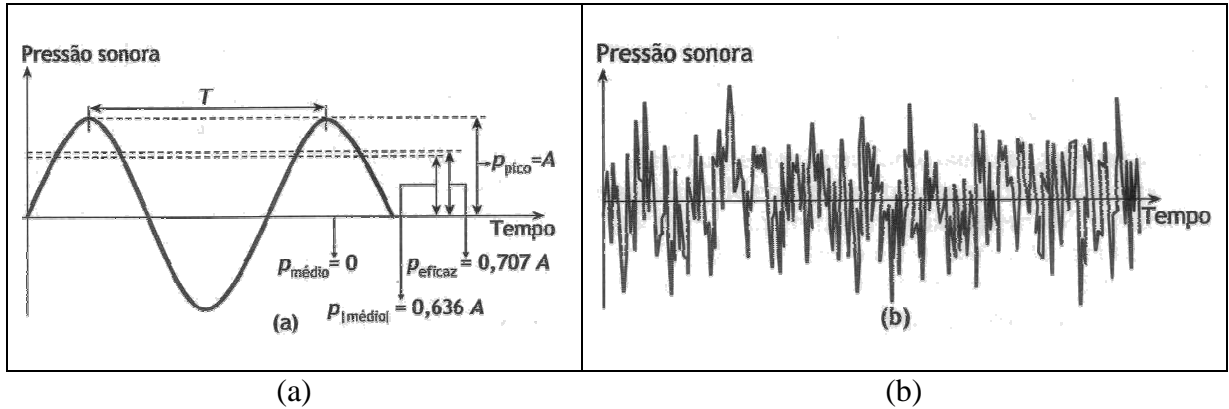
As ondas sonoras podem ser consideradas como ondas harmônicas (ondas em forma senoidais). O movimento ondulatório das ondas sonoras pode ser caracterizado pela Equação (1) (GERGES, 2000; BISTAFÁ, 2006):

$$Y_{(x,t)} = Y_0 \text{ sen}(Kx - ct) \quad (1)$$

Onde:

- $Y(x,t)$  é a amplitude de onda no ponto  $x$  e no momento  $t$ ;
- $Y_0$  é a amplitude máxima;
- $c$  é a velocidade do som (m/s);
- $t$  é o tempo (s);
- $x$  é a posição (m);
- $K$  é o número de onda (radianos).

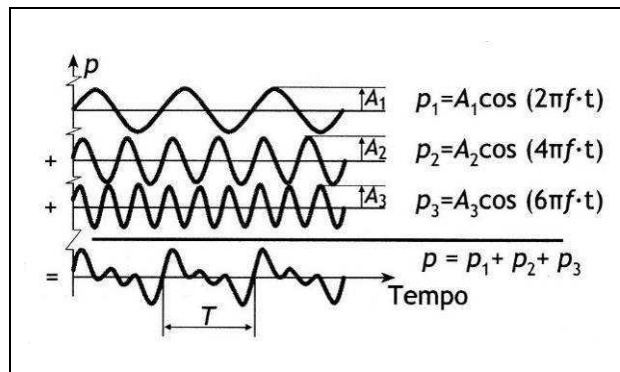
Segundo Bistafa (2006), pode-se distinguir a forma de onda em tom puro ou de um ruído. Na forma de onda de um tom puro, encontra-se uma frequência única (Figura 4a), porém a forma de onda de um ruído é composta por diversas frequências (Figura 4b). O som é o resultado da superposição de tons puros de frequências distintas. Já os ruídos correspondem a ondas sonoras não periódicas e breves, que mudam imprevisivelmente de características (Figura 5).



**Figura 4: Forma da onda: (a) tom puro; (b) ruído**

Fonte: Bistafa (2006)

A velocidade das ondas sonoras varia conforme a elasticidade, a densidade, a pressão, a umidade e a temperatura do meio onde se propagam (GERGES, 2000).



**Figura 5: Superposição de três tons puros nas frequências  $f$ ,  $2f$  e  $3f$**

Fonte: Bistafa (2006)

O valor aproximado da velocidade das ondas sonoras no ar é de 344 m/s, a uma temperatura de 20°C. O som se propaga através do ar com uma velocidade pequena, se comparada com a velocidade de propagação nos sólidos e líquidos. Isso se deve ao fato de que as moléculas que se movimentam se chocam umas nas outras com o intuito de transmitir a onda longitudinal de pressão. Nos sólidos, as moléculas estão mais próximas, difundindo melhor a energia de uma para as outras; sendo assim, a velocidade do som nos sólidos é maior do que nos líquidos e nestes, maior que nos gases (CARVALHO, 1967).

Em dias quentes, o som se transmite com maior velocidade do que nos dias frios, porque o ar quente é menos denso do que o ar frio. A velocidade do som pode ser calculada pela Equação (2) (FRIEDRICH, 2010):

$$c = 331 + 0,6 T \quad (2)$$

Onde:

- $c$  é a velocidade do som no ar (m/s)
- $T$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

Como mencionado anteriormente, o som consiste em uma propagação (variação de pressão) sentida pelo ouvido humano em resultado de uma vibração imposta num determinado meio por uma determinada fonte (BISTAFA, 2006). Essa variação de pressão é caracterizada, principalmente, pela sua intensidade e frequência. A frequência sonora é uma característica de qualquer movimento vibratório e corresponde à “rapidez” com que as moléculas contidas em um determinado meio (ar, água, metais, etc.) vibram, ou a que distância se encontra uma onda sonora em relação à outra. O número de ciclos, ocorridos durante um segundo, por uma partícula em movimento, é expresso em Hertz (Hz) (GERGES, 2000).

O número de vibrações completas (compressões e descompressões) emitidas por uma fonte sonora determina o timbre de um som. Porém, nem todas as flutuações de pressão podem produzir sensação de audição, quando chegam ao ouvido do ser humano. A sensação do som acontece apenas quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se reproduzem estiverem dentro de uma faixa de valores que o ouvido humano é capaz de detectar, com frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz (20 kHz) (GERGES, 2000). A classificação usual dos sons, seguida pela gama de frequência é apresentada no Quadro 1 (CARVALHO, 2006).

**Quadro 1: Esquema de classificação das ondas sonoras quanto à frequência**

Vibrações	Frequência	Audição
Infrassons	Abaixo de 20 Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano
Baixas frequências	De 20 a 200 Hz	Sons graves
Médias frequências	De 200 a 2.000 Hz	Sons médios
Altas frequências	De 2.000 a 20.000 Hz	Sons agudos
Ultrassons	Acima de 20.000 Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano

Fonte: Carvalho (2006)

Para os estudos de materiais, o espectro de frequências audíveis normalmente é dividido em bandas de oitava, padrão de 32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, e 8000 Hz (B & K, 1983).

A medição de ondas sonoras apresenta três características fundamentais: pressão ( $p$ , medida em Pa), potência ( $w$ , em Watts) e intensidade ( $I$ , em  $\text{W}/\text{m}^2$ ). De acordo com Maia

(2003), a pressão sonora também é conhecida como nível de amplitude e se refere à pressão exercida pelo ar, que é expressa coloquialmente como a “altura” ou o “volume” das ondas sonoras. A pressão acústica mede a variação provocada pelo som na pressão do meio em relação à pressão de equilíbrio. Depende da localização da fonte e das características do meio envolvente (energia liberada/ energia absorvida) e é descrita em força por unidade de área que representa a pressão (tensão) (em  $\text{N/m}^2$  ou micropascals  $\mu\text{Pa}$ ). A amplitude normalmente é convertida para potência sonora, em picowatt ( $10^{-12}$  Watts), ou intensidade sonora (em  $10^{-12}$   $\text{Watt/m}^2$ ). Sendo assim, a medida de potência sonora possibilita avaliar a energia sonora que a fonte produz, sendo independente do meio (Energia = Potência x Tempo). Outra característica do som é a intensidade sonora que é sentida como o “volume” do som e identifica a quantidade de energia que atravessa em uma determinada superfície numa determinada direção, permitindo localizar e identificar as fontes sonoras (GERGES, 2000).

A intensidade sonora pode ser calculada conforme a Equação (3):

$$I=P/A \text{ (watt/m}^2\text{)} \quad (3)$$

Onde:

- I é a intensidade sonora (watt/m<sup>2</sup>)
- P é a potência sonora (watt)
- A é a área (m<sup>2</sup>)

Segundo Maia (2003), estas medidas (pressão, potência e intensidade) não são viáveis de se representar diretamente devido à extensão que abrangem, conforme Quadro 2. Como resultado, é utilizada uma escala, cuja unidade é dB (decibel) que representa com maior facilidade a intensidade do som em comparação com a escala absoluta relacionada com a pressão ( $\text{N/m}^2$  ou  $\mu\text{Pa}$ ). O nível sonoro em decibéis é dado pela Equação (4):

$$N_p = 10 \log_{10} (P / P_0)^2 \quad (4)$$

Onde:

- $N_p$  é o nível de pressão sonora (dB),
- P é o valor medido (a amplitude das flutuações de pressão sonora -  $\mu\text{Pa}$ ) e
- $P_0$  é o valor de referência da pressão sonora ( $20 \mu\text{Pa}$  ou  $20 \times 10^{-6}$  Pa)

A percepção do som pelo ouvido humano começa a partir da pressão de 20  $\mu\text{Pa}$  (0 dB) e é chamada de mínima pressão ou limiar da audição. A máxima pressão, por sua vez, é denominada como limiar da dor, que são os sons de grande potência e que causam uma sensação desagradável, muitas vezes dolorosa, correspondendo a 200.000.000  $\mu\text{Pa}$  (140 dB) a 1.000 Hz de frequência de referência, como mostrado no Quadro 2 (Gerges, 2000).

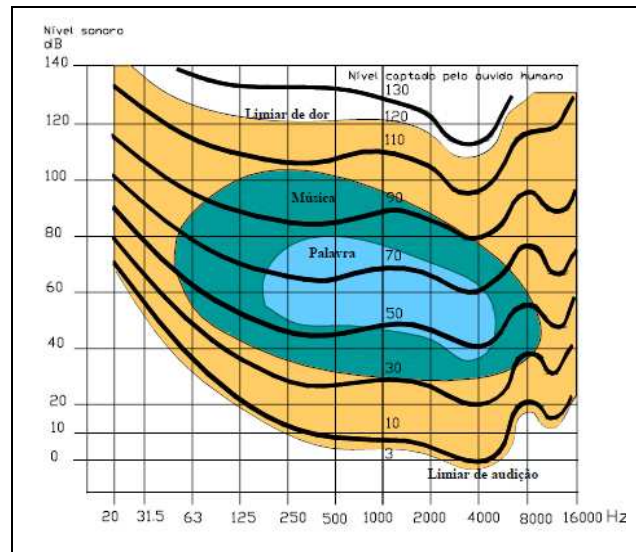
Pela natureza logarítmica da escala decibel, utilizada na caracterização da amplitude do som, a duplicação da intensidade de um som provoca um aumento de 3 dB, e não a duplicação do valor total. No caso de dois níveis sonoros muito diferentes, com uma diferença superior a 10 dB, o nível sonoro global das duas fontes é próximo do parcial mais elevado (70 dB + 85 dB  $\approx$  85 dB). Um aumento de 3 dB é pouco percebido pelo ouvido humano, mas um aumento de 10 dB é notado como uma duplicação de volume (GERGES, 2000).

**Quadro 2: Pressão sonora, intensidade e nível sonoro**

Pressão sonora ( $\mu\text{Pa}$ )	Potência sonora ( $10^{-12}$ watt) ou nível de intensidade sonora ( $10^{-12}$ watt/m <sup>2</sup> )	Nível sonoro (dB)	Exemplo
200.000.000	100.000.000.000.000	140	Limiar da dor
	10.000.000.000.000	130	Rebite em uma chapa metálica
20.000.000	1.000.000.000.000	120	Martelo pneumático
	100.000.000.000	110	Buzina de carro a 1m
2.000.000	10.000.000.000	100	Alarme de relógio a 1m
	1.000.000.000	90	Interior de um metrô
200.000	100.000.000	80	Interior de um ônibus
	10.000.000	70	Ruído de tráfego em cruzamentos
20.000	1.000.000	60	Conversa normal
	100.000	50	Interior de um escritório
2.000	10.000	40	Sala de estar normal
	1.000	30	Quarto de dormir à noite
200	100	20	Estúdio de gravação
	10	10	Respiração normal
20	1	0	Limiar da audição

Fonte: adaptado de Therivel e Morris (1995)

O ouvido humano não reage linearmente a todo o espectro de frequências. A partir de resultados de experiências sobre a sensibilidade do ouvido humano à pressão sonora foram construídas curvas de variação dessa sensibilidade em função da frequência dos sons, criando as curvas isofônicas (curvas de igual sensação sonora), conforme apresentado na Figura 6 (GERGES, 2000).



**Figura 6: Curvas de igual sensação sonora (curvas isofônicas)**  
Fonte: Gerges (2000)

As curvas isofônicas levam em consideração a diferença de percepção do ouvido humano de pessoa para pessoa. Servem para a elaboração da escala dB (A) (decibel A) que é utilizada, na prática, para definir condições de conforto acústico de ambientes. Através deste ábaco (curvas isofônicas para cada faixa de frequência), nota-se que o som enviado e o som percebido para a faixa 1000 Hz possuem grande semelhança, enquanto que, para a gama de frequência de 4000 Hz, a sensibilidade auditiva é maior, em geral, diminuindo nas altas e, especialmente, baixas frequências (CARVALHO, 2006).

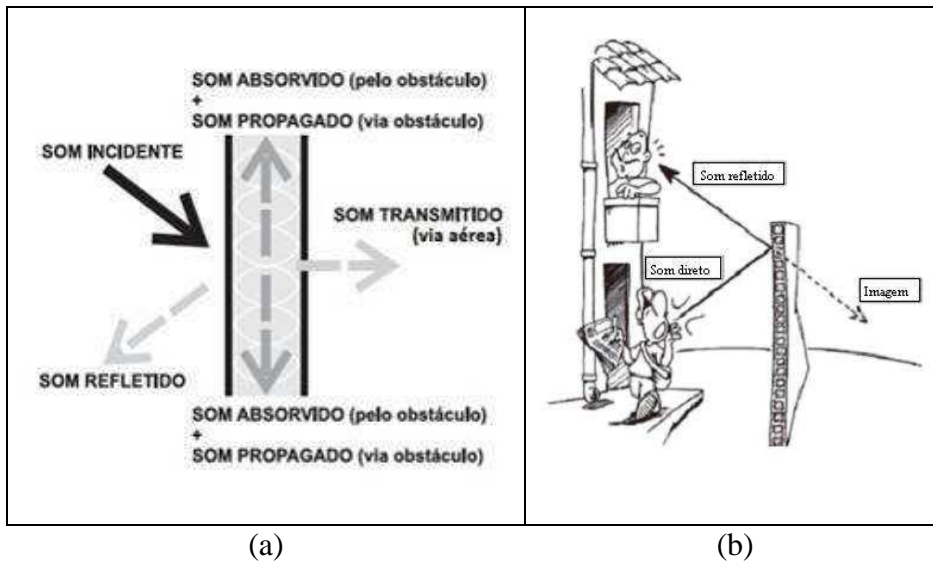
### 2.1.2 Fenômenos acústicos

As ondas sonoras enfrentam fenômenos de absorção, reflexão e refração ao longo de seu percurso da fonte emissora até o receptor. Um receptor sonoro recebe ondas diretamente da fonte e também ondas indiretas. O som, ao incidir em uma superfície pode ser, dependendo das características do material, refletido, absorvido e/ou refratado (CARVALHO, 2006).

Portanto, durante a incidência do som sobre uma superfície, uma parte do som é refletida, uma outra parte é absorvida, sendo que uma terceira parte é transmitida pela parede, conforme Figura 7a (CARVALHO, 2006).

Para que ocorra a reflexão sonora, é necessário que a superfície da parede seja maior que o comprimento de onda do som. Geralmente as altas frequências são refletidas com mais facilidade do que as de baixa frequência. As superfícies lisas e rígidas refletem o som com menor alteração de intensidade (perda), por isso são considerados isolantes, como se pode observar na Figura 7b.





**Figura 7: Incidência do som: (a) sobre uma superfície; (b) reflexão da onda sonora**

Fonte: (a) Carvalho (2006); (b) Souza (2007)

As superfícies perfeitamente lisas não são comuns nas edificações. As superfícies irregulares são as que predominam nas paredes e nos forros, havendo, portanto, perdas nas reflexões sonoras, com uma diminuição da capacidade de isolamento da mesma.

### 2.1.3 Absorção e isolamento acústico

A qualidade acústica de um ambiente é determinada pela capacidade de absorção sonora dos materiais dentro dos recintos. Essa capacidade deve-se às perdas de energia sonora na superfície ou na espessura do material, dependendo de sua estrutura, densidade, elasticidade e outras propriedades físicas (GERGES, 2000)

O isolamento acústico caracteriza-se pela capacidade que determinados materiais têm de formar um obstáculo, impossibilitando que a onda sonora atravesse de um ambiente ao outro. Geralmente, são utilizados materiais densos (pesados) como concreto, vidro e chumbo, pois quanto maior a massa da superfície, menor a possibilidade de vibração entre as moléculas, de acordo com a “Lei das Massas” (CARVALHO, 2006).

A Lei de Berger ou “Lei fundamental do isolamento acústico” determina que um bom isolamento ocorra, quando é utilizado como material isolante um elemento cuja resistividade acústica seja a mais diferente possível daquilo que se quer isolar. De acordo com esta Lei, compreende-se que, para isolar o som que se propaga no ar (meio acusticamente “mole”), devem ser utilizados materiais sólidos, resistentes e pesados; diferente do que ocorre, quando se deseja isolar o som que se propaga nos sólidos (por exemplo, paredes ou estrutura

da edificação), quando o mais recomendado é utilizar materiais mais leves (NEUBAUER, 2008).

Pode-se representar a incidência do som sobre uma construção e o mecanismo de sua transmissão através da Figura 8. Nela observa-se que uma parte da energia que incide ( $E_i$ ) sobre a superfície de uma parede se reflete para o interior do ambiente ( $E_r$ ). A energia remanescente é absorvida e transmitida para os limites do recinto através dos poros do material e por elasticidade e vibração longitudinal na parede (choque das moléculas), de modo que parte seja dissipada ( $E_d$ ), transformando-se em energia calorífica ou mecânica. O restante ( $E_t$ ) atravessa a parede, passando para o outro lado, transmitindo-se através do meio adjacente (SILVA, 1971).

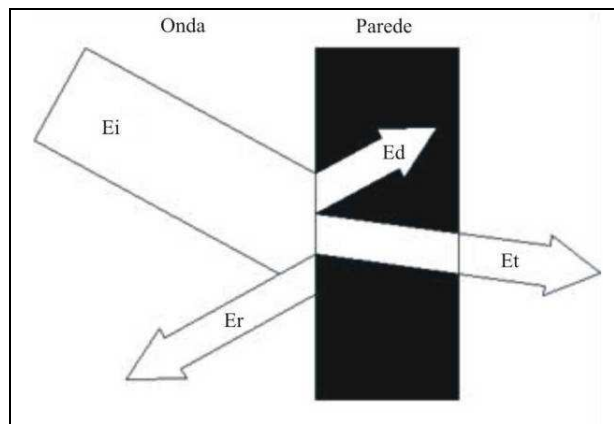


Figura 8: Transmissão, absorção e reflexão do som/ruído em paredes.  
Fonte: Silva (1971)

O Quadro 3 resume os principais tipos e características de materiais que podem ser utilizados para adquirir conforto acústico nos recintos (GERGES, 2000):

Quadro 3: Características gerais dos materiais

Tipo	Ação	Exemplos
Isolantes	Impedem a passagem de ruído de um ambiente para outro.	Tijolo maciço, pedra lisa, gesso, madeira e vidro com espessura mínima de 6 mm. Um colchão de ar é uma solução isolante, com paredes duplas e um espaço vazio entre elas (quanto mais espaço, maior a capacidade isolante).
Refletores	Podem ser isolantes, e aumentam a reverberação interna do som.	Azulejos, cerâmica, massa corrida, madeira, papel de parede (em geral, materiais lisos).
Absorventes	Absorvem o som, evitando ou corrigindo as reflexões visando a otimização do som em um ambiente, diminuindo a potência sonora.	Materiais porosos como lã ou fibra de vidro revestido, manta de poliuretano (dispensa revestimentos), forrações com cortiça, carpetes grossos e cortinas pesadas.
Difusores	Refletem o som de forma difusa, sem ressonâncias.	Em geral, são materiais refletores sobre superfícies irregulares (pedras ou lambris de madeira).

Fonte: adaptado de Gerges (2000)

É possível combinar recursos diferentes, dependendo das necessidades de absorção acústica. Em salas contíguas, por exemplo, com diferentes fontes de ruído, é possível revestir a face interna da parede com material absorvente e a externa, com material isolante.

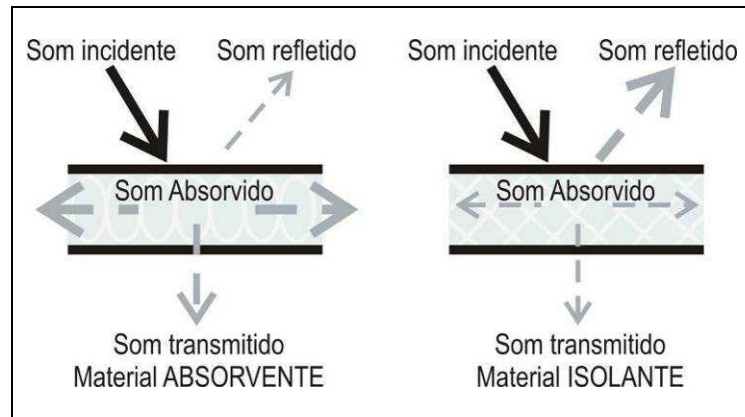
Na construção civil, encontram-se paredes de alvenarias de tijolos cerâmicos maciços ou de blocos de concreto e blocos cerâmicos, com grande espessura e que apresentam as maiores atenuações de ondas sonoras; mas também são comuns as paredes de tijolos vazados mais leves e que atenuam menos o som. Já nas lajes, as maciças de concreto diminuem mais os ruídos que as lajes de elementos vazados (tabelas cerâmicas) (Quadro 4) (CARVALHO, 2006).

**Quadro 4: Isolamento acústico de alguns elementos construtivos**

<b>Material</b>	<b>Atenuação</b>
Parede de tijolo maciço com 45 cm de espessura	55 dB
Parede de 1 tijolo de espessura de 23 cm	50 dB
Parede de meio tijolo de espessura com 12 cm e rebocado	45 dB
Parede de concreto de 8 cm de espessura	40 dB
Parede de tijolo vazado de 6 cm de espessura e rebocado	35 dB
Porta de madeira maciça dupla com 5 cm cada folha	45 dB
Janela de vidro duplos de 3 mm cada separados 20 cm	45 dB
Janela com placas de vidro de 6 mm de espessura	30 dB
Porta de madeira maciça de 5 cm de espessura	30 dB
Janela simples com placas de vidro de 3 mm de espessura	20 dB
Porta comum sem vedação no batente	15 dB
Laje de concreto rebocada com 18 cm de espessura	50 dB

Fonte: Carvalho (2006)

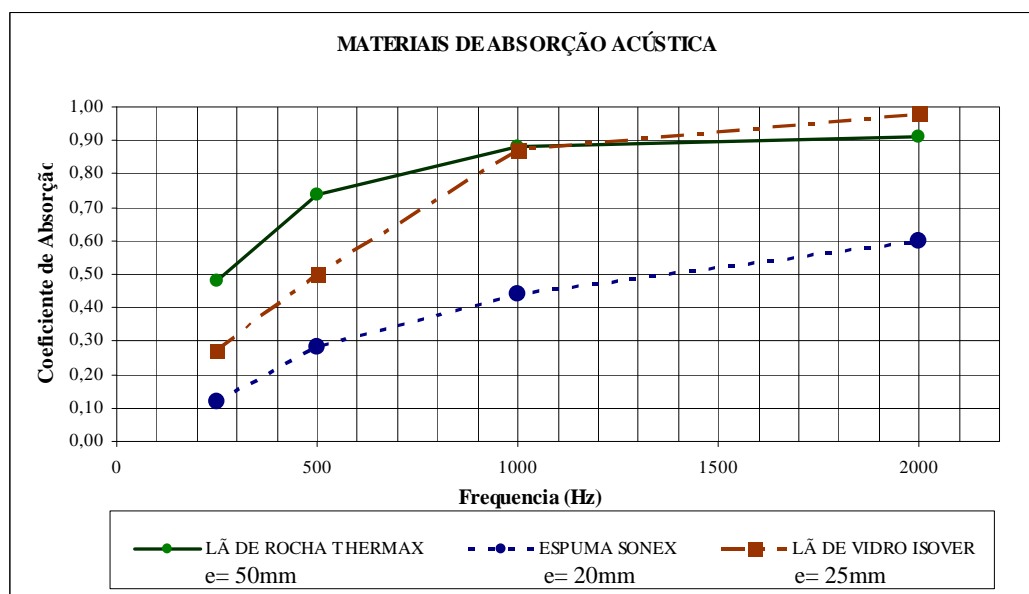
A absorção acústica diminui a reflexão das ondas sonoras, atenuando ou eliminando o nível de reverberação. Nestas circunstâncias pretende-se, além de diminuir os níveis de pressão sonora do ambiente, melhorar os níveis de inteligibilidade da audição. Em oposição aos materiais de isolamento, os materiais absorventes são leves, de estrutura fibrosa ou porosa, na qual o som perde energia por atrito, batendo nos espaços vazios do material. Exemplos como espumas poliéster de células abertas, fibras cerâmicas e de vidro, tecidos grossos e carpetes controlam a reverberação, diminuindo a parcela refletida, para redução do som nos espaços e para o controle de reverberação. Normalmente os materiais de construção existentes no mercado isolam ou absorvem ondas sonoras. O material que tem grande poder de isolamento acústico quase não possui poder de absorção acústica, e vice-versa (CARVALHO, 2006) (Figura 9).



**Figura 9: Comparação entre material absorvente e material isolante**  
 Fonte: Carvalho (2006)

Os materiais com características absorventes atuam sobre uma onda sonora de maneira diferente, sendo influenciados pela frequência da onda que incide sobre eles. Essa propriedade é conhecida como **coeficiente de absorção acústica ( $\alpha$ )**, cuja alteração na frequência (medida em bandas de oitava ou terças de oitava) é denominada “curva de absorção sonora do material”. Esse coeficiente é considerado como a relação entre a energia sonora absorvida e a incidente, sendo sempre positivo e variando de 0 a 1 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ). Quanto mais perto de 1 for o coeficiente de absorção acústica, maior será a absorção do material (GERGES, 2000).

Como exemplo, na Figura 10, demonstram as curvas dos coeficientes de absorção sonora dos materiais absorventes encontrados a venda no mercado, destacando-se a lã de rocha, seguido da lã de vidro e por último a espuma acústica.



**Figura 10: Resultados de absorção sonora referentes aos materiais absorventes**  
 Fonte: adaptado de Bistafa (2006)

Além da frequência, o ângulo de incidência de onda, tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), densidade, espessura e estrutura interna do material também influenciam o coeficiente de absorção sonora (OLIVEIRA; TEODORO, 2005). Como há grande variação de  $\alpha$  com a frequência, adota-se um número representativo de absorção, denominado Coeficiente de Redução de Ruído ou (*NOISE REDUCTION COEFFICIENT*), *NRC*, o qual é utilizado para realizar comparações e análises dos materiais, sendo determinado pela média aritmética dos coeficientes de absorção nas bandas de oitava de 250, 500, 1000 e 2000 Hz (GERGES, 2000), ou seja, Equação (5):

$$NRC = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) / 4 \quad (5)$$

#### 2.1.4 Fundamentos sobre ruído

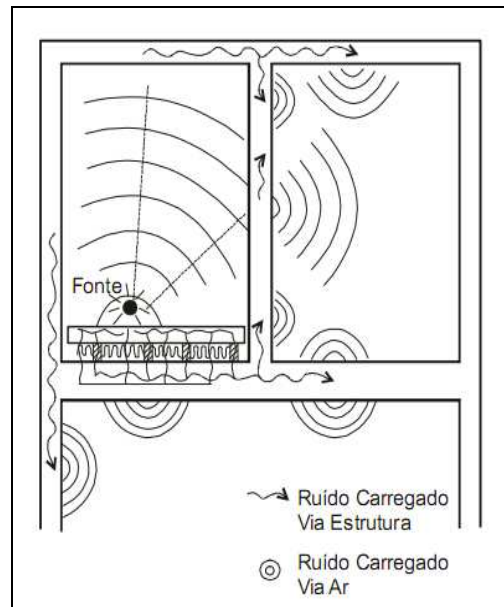
O ruído pode ser considerado de forma geral como um som indesejado e desagradável (GERGES, 2000). Porém, é importante observar que um som pode ser indesejável para um indivíduo, mas não para outro (CATAI et al, 2006). Para Lida (2005) “o ruído é o estímulo auditivo que não contém informações úteis”.

Segundo Gerges (2000), quando há a exposição a níveis altos de ruído, por longos períodos, pode ocorrer dano ao sistema auditivo do ser humano, com a perda da audição. Além disso, implica em alterações comportamentais como: nervosismo, fadiga mental, frustração, prejuízo no desempenho no trabalho, irritabilidade, entre outros (GERGES, 2000).

O estudo da acústica em edifícios implica na análise das fontes de ruído, além do condicionamento acústico dos recintos e o dimensionamento do envoltório das construções. As fontes de ruídos no interior de uma edificação podem ser representadas por: equipamentos, elevadores, escadas, instalações (redes de água e esgoto), eletrodomésticos, rádios, televisores, telefones, instrumentos musicais e ação dos usuários (caminhada, abrir e fechar portas, movimento de cadeiras, móveis, conversas).

Os ruídos podem ser classificados em duas categorias: ruídos estruturais (de impacto) e ruídos aéreos. Os ruídos de impacto são transmitidos pela comunicação direta da energia que produz vibrações nos elementos de construção (piso, paredes, coberturas), ou seja, a onda de energia é propagada através de elementos duros e contínuos. Assim, o som pode ser provocado pelo caminhar das pessoas, fechar de portas ou martelar numa parede (FERRAZ, 2006). Os ruídos aéreos são transmitidos pela emissão sonora e derivam da

excitação direta do ar, como explicado anteriormente. Os sons são provocados pelo tráfego de veículos, conversas e instrumentos musicais, conforme Figura 11 (GERGES, 2000).



**Figura 11: Formas de transmissão de ruído**  
Fonte: Gerges (2000)

A maioria das fontes produz tanto o ruído aéreo como o ruído estrutural. Por exemplo, motores e máquinas geram ruídos aéreos e suas vibrações geram ruído estrutural (FERRAZ, 2006).

O ruído é influenciado por vários fatores, entre eles as características da fonte sonora, as situações no caminho entre a fonte e o receptor (som direto, som reflexivo) e as condições do próprio receptor.

### 2.1.5 Propagação do ruído

Segundo Duarte e Viveiros (2004), países tropicais como o Brasil possuem edificações com características desfavoráveis para um bom isolamento sonoro: possuem várias aberturas e menor densidade nas paredes de suas fachadas. Os vãos, necessários para a ventilação, deixam passar o ruído externo. Quando os fechamentos das construções são leves, os sons são transmitidos com maior facilidade para o interior da habitação.

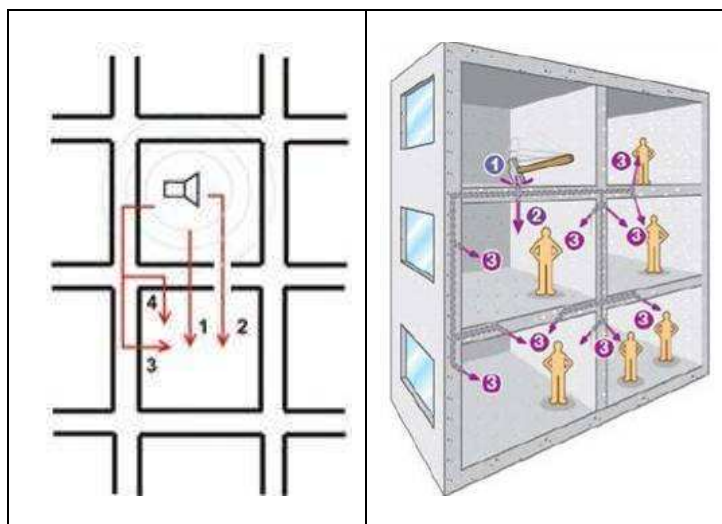
O nível de isolamento sonoro no interior de uma residência é influenciado por três aspectos: a fachada, que protege contra o ruído externo, sendo a vedação das aberturas o aspecto mais importante para o seu desempenho; as vedações horizontais, que, no caso das lajes nos apartamentos residenciais, diminuem o ruído de impacto produzido por vizinhos de

andares superiores e inferiores; e, por fim, as paredes de vedação, que isolam o ruído advindo de edificações vizinhas e/ou do exterior.

Uma parede composta por elementos com diferentes desempenhos de isolamento, como portas, janelas e alvenaria, terá seu desempenho final estabelecido pelo elemento de menor desempenho (LOSSO e VIVEIROS, 2004). Portanto, para isolar um ambiente contra o ruído, é importante conhecer a natureza do som, de onde ele está sendo gerado e que caminho está percorrendo.

A transmissão de ruídos em uma edificação com ambientes vizinhos (Figura 12), sendo composto por elementos contínuos como paredes e lajes, depende de dois fatores:

- a) Transmissão direta via parede ou painel (transmissão marginal);
- b) Transmissão secundária:
  - Através de elementos adjacentes (janelas, portas, entre forros e entre pisos);
  - Através de uma via aérea indireta (dutos de ar, tubos de água, eletrodutos);
  - Através de pontos fracos do próprio elemento de separação (frestas próximas a pilares, lajes e/ou paredes confluentes).



**Figura 12: Diferentes caminhos de transmissão da energia sonora**  
 Fonte: Adaptado de Chichierchio (2006); Isover (2011).

Onde:

- 1 é a transmissão por vibração dos elementos;
- 2 é a transmissão por fendas;
- 3 e 4 são de transmissão marginal;

Portanto, a geometria do espaço e a capacidade de absorção sonora dos revestimentos também são questões importantes para análise. Para escolher o correto revestimento, faz-se necessário ter o conhecimento das características acústicas dos materiais (CARVALHO, 2006).

## **2.2 CONFORTO ACÚSTICO**

Com a chegada de novas tecnologias e a busca pela competitividade, é necessário considerar o quanto o desempenho e a qualidade das edificações podem ser alterados para atender às necessidades de conforto e bem-estar do consumidor. Em função de redução de custos, alguns itens de projeto acabam sendo comprometidos, como, por exemplo, o conforto acústico. Paredes e lajes mais delgadas, esquadrias menos estanques ao ruído aéreo e a transmissão de ruídos de impacto são alguns problemas enfrentados pelos usuários, prejudicando o desempenho acústico das edificações realizadas no Brasil (AKKERMAN, 2010).

Conforto acústico pode ser considerado como um conceito de caráter subjetivo. Porém, procura-se traduzir esse estado de espírito (subjetividade) em parâmetros de caráter objetivo, mensuráveis, para poder avaliar e proporcionar satisfação com o ambiente que envolve o indivíduo (FERREIRA, BERTOLI, 2008). Segundo Vianna; Ramos (2005) apud Catai et al. (2006), “só existe conforto quando há um mínimo de esforço fisiológico em relação ao som (e a luz, ao calor e à ventilação) para a realização de uma determinada tarefa. Um ambiente confortável proporciona bem estar e harmonia quando as necessidades são atendidas”.

As escolhas dos profissionais na área da construção civil devem ser direcionadas para oferecer conforto aos usuários. Para que isso ocorra, dados devem ser disponibilizados para que se possa determinar o desempenho correto dos materiais, estimulando toda a cadeia produtiva da construção civil às inovações tecnológicas e às garantias de vida útil (AKKERMAN, 2010).

O nível de ruído elevado provoca o desconforto do usuário, prejudicando o desempenho de tarefas, tais como estudo e lazer, além de prejudicar a compreensão da fala e o sono (MURGEL, 2007). Ruídos causados por tubulações hidrossanitárias, caminhar normal de pessoas, o arrastar de móveis e outros atritos mecânicos são problemas contínuos na vida dos usuários, que comprometem o conforto e atrapalham a vida de quem mora em edifícios.



### 2.2.1 Projeto

O controle dos ruídos abrange várias estratégias projetuais, que vão desde o afastamento da fonte de ruído pela escolha de implantação dos edifícios, até a determinação dos materiais de fechamento, tamanho e posicionamento das aberturas. As paredes e lajes, as divisórias e determinados materiais construtivos têm a capacidade de atenuar a transmissão de energia sonora de um ambiente para outro. Segundo Lopes (2010), barreiras acústicas podem ser projetadas para atenuar ruídos em locais críticos, como aeroportos e vias de muito tráfego, sendo que a vegetação é um outro elemento de atenuação sonora.

Portanto, a acústica dos ambientes pode ser influenciada por detalhes construtivos, acabamento das superfícies e pequenas modificações em uma determinada tipologia. Cada escolha realizada quanto ao tipo de estrutura, cobertura, materiais de revestimento ou sistema de climatização, modifica a forma do edifício, a flexibilidade do recinto e o comportamento do som em seu interior (LOPES, 2010).

Segundo Schimid (2005), dois espaços distintos podem fazer o mesmo som transmitir-se de maneira diferente, sendo que, num ambiente pequeno, com superfícies duras e lisas, o som é bastante amplificado. Porém, num recinto de grande volume, sem qualquer superfície absorvedora, é provável que ocorra a reverberação e o som seja percebido sem clareza e bastante confuso.

A forma externa também pode influenciar na acústica de uma edificação. Ela pode auxiliar na proteção contra os ruídos externos. O teto das sacadas, caso seja tratado com um material absorvente, pode impedir que o som seja refletido para dentro da construção (EGAN, 1988).

No projeto da fachada, o funcionamento das esquadrias é fundamental, e pode ser melhorado com o uso de vidros duplos ou laminados, bem como caixilhos e montantes, que devem ser bem vedados. Vidros de 3 ou 4 mm, amplamente utilizados pelas construtoras, não oferecem barreiras adequadas para o ruído aéreo externo, que penetra dentro dos recintos, comprometendo assim, o conforto acústico (LOPES, 2010).

Com relação aos pisos e lajes dos edifícios, deve-se levar em consideração a atenuação dos ruídos aéreos, propagados pelo ar, e de impacto, transmitido pelas estruturas. Lajes pesadas de concreto atenuam bem os sons aéreos, mas são grandes facilitadores da transmissão de ruídos de impactos. Para a minimização desse ruído nas estruturas das lajes e pisos, a melhor maneira de absorver os impactos produzidos em andares superiores é a adoção

de materiais macios nos acabamentos dos mesmos, como carpetes e pisos emborrachados. No entanto, nos ambientes como cozinha e banheiros, torna-se impossível o uso desses materiais, pois são necessários pisos de fácil limpeza e manutenção, como os revestimentos cerâmicos (CARVALHO, 2006).

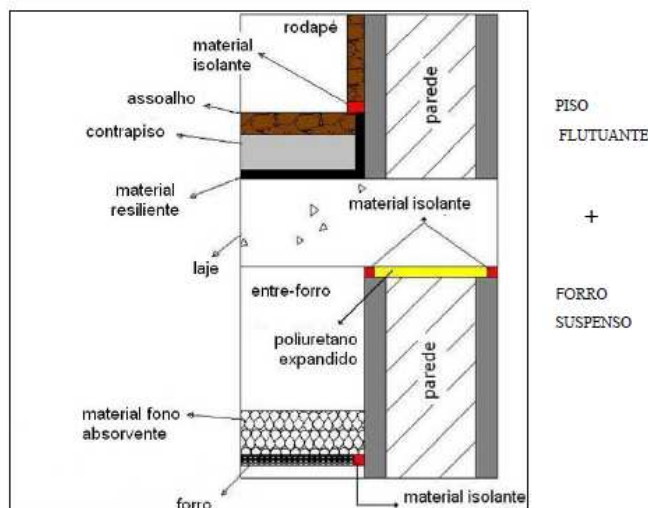
**Quadro 5: Melhoria na redução de ruídos de impacto com revestimentos flexíveis e pavimentos flutuantes**

Solução construtiva	Atenuação de ruídos em dB
<b>Em Pavimentos</b>	
Plástico (PVC, vinílico)	6
Flutuante de concreto sobre feltro	7
Plástico sobre cortiça	8
Plástico sobre feltro	10
Parquet de cortiça plástico sobre espuma	11
Flutuante de concreto sobre fibra mineral	15
Flutuante de concreto sobre placas de poliestireno expandido	18
Tapete	16
Flutuante de parquet	18
Tapete sobre feltro	20
Tapete sobre espuma	22
<b>Em tetos</b>	
Forro falso	10

Fonte: Carvalho (2006)

Para reduzir a transferência de impactos, utilizam-se os pisos flutuantes sobre bases elásticas (material resiliente), que desconectam os contrapisos e os pisos dos elementos estruturais e/ou de vedação. Existem diferentes maneiras de construir um piso flutuante, seja com acabamento convencional de tacos de madeira, como os assoalhos, os laminados de madeira, as placas vinílicas, as placas cerâmicas, os mármore, os granitos, ou, inclusive, o carpete (CARVALHO, 2009).

A instalação de forros suspensos de painel duplo de gesso acartonado é uma alternativa para atenuar os ruídos de impactos, quando a construção já está finalizada e ocupada (FERRAZ, 2006) (Figura 13).



**Figura 13: Exemplo de mecanismo de isolamento de ruído de impacto**  
 Fonte: Ferraz (2006)

## 2.2.2 Estudos no Brasil

A questão do ruído nas edificações vem sendo discutida no Brasil há algum tempo, sendo citada já em Souza; Mitidieri Filho (1988). Vianna; Roméro (2002) apresentaram estudos sobre o conforto ambiental em edificações de interesse social localizadas em São Paulo, utilizando Avaliação Pós-Ocupação (APO) e considerando as exigências para cada um dos ambientes da edificação. Mais especificamente, existem alguns estudos sobre a influência de partes das edificações.

Grande parte da questão está focada nas vedações exteriores e interiores, revestimentos e sistemas de laje (forro e piso). Duarte; Viveiros (2007) examinaram as paredes de vedação, estudando a evolução histórica dos principais processos construtivos empregados no país, concluindo que o nível de isolamento acústico vem decrescendo, sendo atualmente bastante inferior ao oferecido por edificações construídas há algumas décadas.

Losso; Viveiros (2004) estudaram as vedações internas em gesso acartonado, concluindo que o nível de isolamento acústico constatado na prática é bastante inferior aos níveis divulgados pelos fabricantes, geralmente em função de erros de detalhamento ou execução dos painéis.

Mateus et al. (2008) realizaram um estudo sobre o isolamento acústico de pavimentos flutuantes, indicando as dificuldades deste tipo de revestimento de piso. Outros estudos indicam a dificuldade de isolamento acústico em lajes planas pró-tendidas e lajes nervuradas, que facilitam a propagação de ruídos em relação às lajes maciças tradicionais. Por fim, importante contribuição é de Polli; Viveiros (2007) que indicaram que o isolamento

acústico é baixo, sendo significativamente inferior aos padrões aplicados na Europa, e detectaram que o problema ocorre em imóveis de diferentes padrões, ou seja, os autores concluem que, no Brasil, o isolamento acústico é deficiente, tanto em edificações de alto padrão, quanto de baixo padrão construtivo.

### **2.2.3 Normas técnicas que abordam o conforto acústico**

O conceito de desempenho vem sendo discutido no mundo há, cerca de 40 anos, e no Brasil, há mais de 20 anos. Na Europa, por exemplo, foi desenvolvido um extenso programa de pesquisas, indicando a diversidade de critérios regionais e sistematizando as ferramentas de apoio às decisões disponíveis atualmente (FOLIENSTE, 2005; PORKKA; HUOVILA, 2005).

Para Gonçalves et al. (2007), o desempenho pode ser definido como o comportamento em uso de um produto, o qual deve possuir propriedades que exerçam a função indicada, quando submetido a determinadas influências ou ações (condições de exposição) durante a sua vida útil. Portanto, analisar o desempenho de um produto requer especificar qualitativa e/ou quantitativamente quais são os pré-requisitos que devem ser alcançados por ele, quando sujeito às condições de uso e quais os meios para avaliar se as condições estabelecidas foram alcançadas. A seguir algumas normas brasileiras que enfatizam o conceito de conforto acústico nas construções.

a) NBR 10.151 – Acústica – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, Visando ao Conforto da Comunidade – Procedimento.

Em 2003, esta Norma foi atualizada e determina as condições necessárias para a avaliação da aceitabilidade de ruídos em comunidades, especificando procedimento para a medição dos mesmos. Propõe conceitos de níveis de pressão sonora e ruídos, além de especificar quais os equipamentos de medição devem ser atendidas pela norma. Segundo Silva (2005), a revisão atual da norma representa uma cópia fiel da ISO 10534-1 (1996) (Européia), de maneira que o exigido pela mesma estava muito acima do que representa a realidade brasileira (ABNT, 2003).

b) NBR 10.152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico.

Esta Norma foi proposta originalmente no ano de 1987 e determina os níveis de ruído, proporcionando ao ser humano algum conforto e bem-estar em vários recintos, de uso comum. Enfatiza também o método de avaliação do ruído por meio de curvas de avaliação do

ruído (NC), através das quais um espectro sonoro pode ser comparado, possibilitando uma identificação das bandas de frequência mais significativas e quais necessitam correção. Sua última atualização aconteceu em 1992 (ABNT, 1992).

c) NBR 15.575 – Edifícios Habitacionais de Até Cinco Pavimentos – Desempenho – Partes 03 e 04 – Refere-se ao isolamento acústico para requisitos de sistemas de pisos internos entre ambientes e sistemas de vedações verticais externas e internas (paredes).

No Brasil, para qualificar o setor da construção civil e diminuir o número das construções de qualidade deficiente, foi aprovada a norma NBR-15575, que estabelece critérios de desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos e envolve vários requisitos a que uma edificação deve atender, de acordo com as exigências dos usuários, em termos de habitabilidade e uso. Essas exigências são utilizadas como referência para o estabelecimento dos requisitos e critérios, como a segurança, a habitabilidade e a sustentabilidade. A norma não determina os produtos a serem escolhidos pelos arquitetos ou engenheiros, mas indica o que esses materiais devem atender, como por exemplo: padrões mínimos de desempenho térmico, acústico, de iluminação, segurança estrutural, entre outros (ABNT, 2010).

A NBR-15575, dividida em seis partes, tem como objetivo estabelecer parâmetros mínimos obrigatórios de qualidade para alguns sistemas construtivos, como: estruturas, pisos internos, paredes e vedações, coberturas e sistemas hidrossanitários ao longo da vida útil de uma construção.

Uma das barreiras à introdução da abordagem de desempenho nos projetos é a dificuldade de tradução das necessidades dos usuários em requisitos e critérios que possam ser mensurados de maneira objetiva. Outras dificuldades são a viabilidade técnica e econômica, a necessidade de adaptação às condições regionais e a falta de conhecimento dos projetistas (BORGES; SABBATINI, 2008).

A NBR 15575 determina duas maneiras pelas quais se podem realizar comparações de desempenhos: ensaios de campo e ensaios de laboratório. Os ensaios de campo constituem em medições e resultados alcançados através de equipamentos utilizados em construções já finalizadas ou em fase de acabamento, enquanto os ensaios de laboratório consistem em resultados adquiridos por meio de formulações analíticas e ábacos, também

ocorrendo ensaios e simulações de materiais e componentes construtivos em laboratórios especializados.

A maioria dos documentos internacionais determina um valor para um único nível de desempenho, porém, a norma NBR 15575 apresenta critérios que podem ser avaliados para três níveis diferentes, sendo **M**, para nível mínimo, **I** para nível intermediário e **S** para nível superior.

De acordo com a recomendação da norma de “Desempenho de Edifícios Habitacionais de até cinco pavimentos, Parte 3: Pisos Internos”, o piso de uma habitação deve promover o isolamento acústico adequado entre unidades distintas contíguas, bem como entre dependências de uma mesma unidade, quando destinada ao repouso, ao lazer e ao trabalho intelectual. A norma também determina os métodos recomendados para os ensaios de campo para o alcance do isolamento acústico, referenciando as normas ISO 140-7 e ISO/DIS 10052 e a norma ISO 717-2 para a obtenção do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L_{nT,w}$ ) que define os níveis de desempenho dos sistemas (ISO, 1998; PEREYRON, 2009).

“O Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado ( $L_{nT,w}$ ) é o número único do isolamento de **ruído de impacto** em edificações, derivado dos valores em bandas de oitava do Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado ( $L_{nT}$ ), de acordo com o procedimento especificado na Norma ISO 717-2- *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and building elements – Part 2: Impact sound insulation*” (ISO, 1996; NBR 15575, 2010).

Seguindo essa norma (Parte 3) os valores dos Níveis de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado ( $L_{nT,w}$ ) entre piso dos ambientes estão mencionados ao padrão estrutural brasileiro de laje nua (maciça), possuindo espessura entre 10 a 12 cm, com ou sem contrapiso, e sem tratamento, tendo como nível de desempenho mínimo (**M**) exigido, um valor limite da transmissão sonora. Outros elementos de pisos não tratados, com ou sem contrapiso, também deverão obedecer ao mesmo critério da laje nua (CARVALHO, 2009).

No Quadro 6, verifica-se a especificação dos níveis de desempenho para o ruído de impacto em lajes. Os valores são definidos em  $L_{nT,w}$  (nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado) e descreve três situações para as lajes de entre piso.

**Quadro 6: Critérios de nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, ( $L'_{nT,w}$ ) para ensaios de campo Índice de redução sonora ponderado dos elementos construtivos ( $R_w$ ), para ensaio de laboratório.**

Elemento	$L'_{nT,w}$ (dB)	Índice de redução sonora ponderado $R_w$ (dB)	Nível de desempenho
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, <b>sem tratamento acústico</b>	66 a 80	71 a 85	Mínimo
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, <b>com tratamento acústico</b>	56 a 65	61 a 70	Intermediário
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, <b>com tratamento acústico especial</b>	$\leq 55$	$\leq 60$	Superior

Fonte: Adaptado da Tabela 5 da Norma NBR 15575-3 (2010) Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos.

“O isolamento sonoro entre ambientes deve apresentar Diferença Padronizada de Nível Ponderado ( $D'_{nT,w}$ ). Esta Diferença Padronizada de Nível Ponderado ( $D'_{nT,w}$ ) é o número único do isolamento de **ruído aéreo** em edificações, derivado dos valores em bandas de oitava da Diferença Padronizada de Nível ( $D'_{nT}$ ) entre ambientes, de acordo com o procedimento especificado na Norma ISO 717-1- *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and building elements – Part 1: Airborne sound insulation* (ISO, 1996). O piso, ou o conjunto piso e forro da unidade habitacional inferior, deve apresentar Índice de Redução Sonora Ponderado ( $R_w$ )” (NBR 15575, 2010).

O Quadro 7 apresenta os níveis de isolamento de ruído aéreo em campo e em laboratório, para as partições entre unidades habitacionais, recomendados pela norma NBR 15575 - Parte 4.

**Quadro 7: Diferença padronizada de nível ponderada entre ambientes,  $D_{nT,w}$ , para ensaio de campo e Índice de redução sonora ponderado dos elementos construtivos,  $R_w$ , para ensaio de laboratório.**

Elemento	$D_{nT,w}$ (dB)	Índice de redução sonora ponderado $R_w$ (dB)	Nível de desempenho
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação)	40 a 44	45 a 49	Mínimo
	45 a 49	50 a 54	Intermediário
	$\geq 50$	$\geq 55$	Superior

Fonte: Adaptado da Tabela 19 da Norma NBR 15575-3(2010) Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas.

Essa norma torna-se uma ferramenta fundamental para as construtoras, pois as ajudará a avaliar o desempenho e a qualidade de seus edifícios, e, caso seja necessário, melhorá-los. Também será um instrumento valioso para os fabricantes de materiais da construção civil, uma vez que terão a base para fabricar produtos com o desempenho esperado e divulgarão as informações técnicas necessárias para qualificar o seu produto. Já para os consumidores, a norma auxiliará no que esperar do desempenho de uma edificação destinada

para a moradia ou para o trabalho (MITIDIERI FILHO, 2004). As construtoras terão que se adequar à norma, pois poderão responder judicialmente, caso ofereçam produtos de qualidade inferior para os consumidores. Essa norma atingirá, além das construtoras e os fornecedores de materiais, também projetistas, incorporadoras e órgãos de financiamento (MITIDIERI FILHO, 2004).

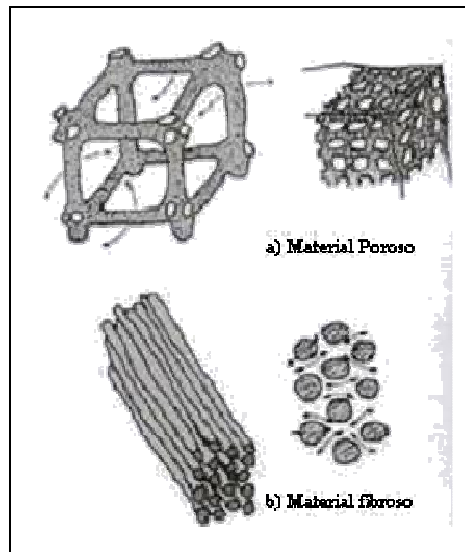
## **2.3 MATERIAIS ACÚSTICOS**

### **2.3.1 Materiais convencionais para isolamento e condicionamento acústico**

Os materiais usados na construção civil, principalmente para a função estrutural e de vedação (blocos cerâmicos e de concreto, o concreto armado, vidro, mármore, madeira), possuem características isolantes, mas nem sempre suficientes para atenuar o nível de ruído (CATAI et al., 2006). Materiais como lã de vidro, lã de rocha, espuma elastomérica foram desenvolvidos para isolar acusticamente e termicamente os ambientes, os quais têm como características a baixa densidade.

Os materiais que apresentam melhor capacidade de absorver o som são aqueles de composição porosa ou fibrosa (Figura 14). Os materiais fibrosos são compostos por uma grande quantidade de fibras cruzadas, ao contrário dos materiais porosos que são constituídos de vários espaços vazios ou orifícios, que se comunicam entre si. Nesses dois tipos de materiais, a energia acústica incidente se dissipa em energia calorífica, devido ao condicionamento do ar, às perdas de escoamento dentro do material, e também devido às perdas causadas por atrito interno no movimento das fibras. A atenuação da onda no meio poroso depende do tamanho dos poros e da proporção de microcavidades abertas que possui o material. Da mesma forma, essas propriedades estão diretamente relacionadas com o tamanho, a forma e a densidade das partículas e fibras que constituem a estrutura do material estudado (CATAI et al., 2006).



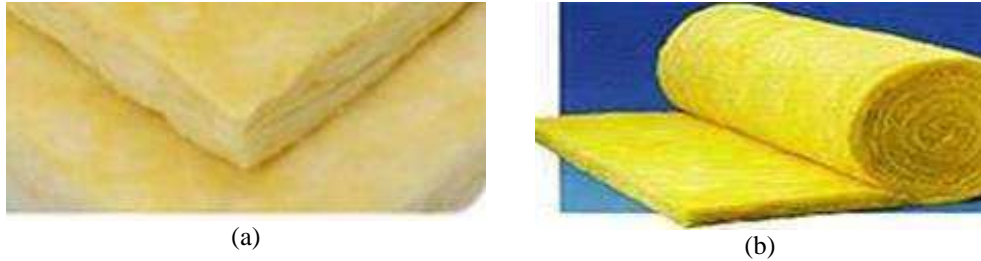


**Figura 14: Estrutura de materiais acústicos: (a) porosos; (b) fibrosos**  
Fonte: Gerges (2000)

Dentre os materiais fibrosos mais utilizados para o isolamento, destacam-se a lã de vidro e a lã de rocha e, dentre os porosos, a espuma acústica se sobressai. Baseado nos estudos destes pode-se chegar a informações que levem a um adequado desenvolvimento de materiais inovadores, com a utilização de resíduos, apresentando características semelhantes e assim, desempenhando um bom isolamento, proporcionando conforto acústico aos recintos.

### **2.3.1.1 Lã de vidro**

A lã de vidro é um material bastante conhecido, e é considerado como um dos melhores absorventes acústicos. Sua composição é formada por partículas de sílica e sódio, aglomeradas por uma resina sintética de alto-forno. Sua composição estrutural indica que é constituída por fibras entrecruzadas desordenadamente que, em contato com a onda sonora, possibilita a absorção da mesma, apresentando, dessa maneira, um ótimo coeficiente de absorção sonora. Além disso, é leve, de fácil manutenção, incombustível e resistir à maresia e corrosão (ISAR, 2011). É utilizada sobre paredes, em placas revestidas por tecidos ou painéis perfurados e em forros ou paredes duplas (sistema massa-mola-massa) substituindo as paredes pesadas. A lã de vidro apresenta densidades que variam de 10 a 110 Kg/m<sup>3</sup>, sendo oferecido no mercado brasileiro em mantas ensacadas com polietileno ou manta aluminizada (Figura 15) ou revestida com feltro e manta fibro-cerâmica para tubulações e equipamentos com temperaturas elevadas (ISAR, 2011).



**Figura 15: Lã de vidro em (a) placas e em (b) manta - IsoSound Glass Fabrics**  
Fonte: Isar (2011)

Por possuir grande elasticidade, torna-se bastante adequada para a utilização em pisos flutuantes, o que ameniza o ruído de impacto. Seu coeficiente de absorção varia de 0,58 em 250Hz a 1,00 em 1000Hz. Tabela 1, com as indicações de frequência e coeficiente de absorção sonora.

**Tabela 1: Absorção sonora da lã de vidro, IsoSound Glass Fabrics**

Frequência (Hz)	Absorção sonora						NRC
	125	250	500	1000	2000	4000	
Coefficiente de Absorção Sonora	0,21	0,58	0,84	1,00	0,99	1,03	0,85

Fonte: Isar (2011)

Conforme a Tabela 1, observa-se que existem valores de absorção sonora superiores a 1, sendo estes valores previstos em norma. Porém, para realizar corretamente os projetos, utilizam-se valores igual a 1. A execução dos testes foi realizada de acordo com as Normas ISO/R-354 e ASTM C - 423 – 81. (ISO, 2003)

### 2.3.1.2 Lã de rocha

A lã de rocha é também uma lã mineral, produzida a partir de rochas basálticas aglomeradas com resina sintética. É indicada tanto para o tratamento térmico como acústico, sendo incomburente, possuindo pH neutro e não corrosível. Sua instalação requer um pouco de cuidado, pois seu manuseio pode ser prejudicial à saúde (ISAR, 2011).

Sua utilização ganha destaque em forros, divisórias, em dutos de ar-condicionado e em tubulações de baixa, média e alta temperatura (50 a 750 °C). No mercado consumidor, apresenta-se em forma de painéis e mantas revestidas (Figura 16) com plástico auto-extinguível, de manta com “kraft aluminizada”, entre outras (ISAR, 2011).



**Figura 16: Feltro de lã de rocha (a) em painéis e (b) aluminizado**

Fonte: Isar (2011)

Possui várias densidades que variam de 30 a 200 kg/m<sup>3</sup>, sendo produtos leves e flexíveis, podendo também ser muito rígidos. Os coeficientes de absorção sonora típicos estão indicados na Tabela 2.

**Tabela 2: Coeficientes de absorção da lã de rocha, IsoSound Glass Fabrics**

Produto	Espessura (mm)	Frequência (Hz)						NCR
		125	250	500	1000	2000	4000	
PSL - 32	50	0,16	0,52	0,82	0,92	0,94	0,96	0,80
PSL - 32	100	0,85	0,98	1,01	1,11	1,09	1,18	1,05
PSE - 64	50	0,16	0,66	1,00	1,05	1,02	1,04	0,93
PSE - 64	100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,09	1,17
PSE - 80	50	0,14	0,68	1,00	1,04	0,96	1,00	0,92
PSE - 80	100	0,88	1,23	1,19	1,16	1,12	1,09	1,18

Obs. Os valores superiores a 1 estão previstos em norma. Para efeito de projeto, utilizam-se valores de coeficiente de absorção acústica igual a 1. Testes foram efetuados de acordo com as Normas ISO/R-354 e ASTM C - 423 - 81 (ISO, 2003)

Fonte: Isar (2011)

### 2.3.1.3 Espumas acústicas

A espuma acústica é um material com boas propriedades acústicas. Dentre os produtos utilizados no mercado, a linha SONEX se destaca, fabricada pela empresa illbruck (Figura 17). São espumas de poliuretano cuja absorção diminui a reverberação do som, diminuindo o volume dos ruídos.



(a)

(b)

(c)

**Figura 17: Imagem ilustrativa: (a) espuma acústica Sonex; (b) espuma acústica em indústrias; (c) forro absorvedor**

Fonte: illBruck (2011)

As dimensões das placas são de 1000 x 1000 mm, podendo ser produzida em dimensões especiais e as espessuras variam de 20, 27, 35, 42, 50, 58, 66, 75 mm. As espumas de poliuretano são consideradas combustíveis, porém recebem tratamento através de aditivos que retardam a chama, melhorando a seu desempenho quanto à segurança ao fogo (ILLBRUCK, 2011).

A absorção acústica das espumas está demonstrada na Tabela 3, que reproduz os valores alcançados em medição de absorções sonoras em câmara reverberante realizadas pelo método descrito na norma internacional ISO 354, em laboratório normatizado (ILLBRUCK, 2011; ISO 2003).

**Tabela 3: Coeficientes de absorção da espuma acústica**

<b>Freq. (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>NRC</b>
<b>20/35</b>	0,06	0,10	0,21	0,38	0,55	0,81	0,310
<b>27/35</b>	0,09	0,14	0,31	0,62	0,91	0,96	0,495
<b>35/35</b>	0,11	0,21	0,48	0,71	0,86	0,94	0,565
<b>42/75</b>	0,10	0,23	0,50	0,77	0,99	0,96	0,622
<b>50/75</b>	0,13	0,34	0,72	0,94	0,90	0,97	0,725
<b>66/75</b>	0,15	0,45	0,69	0,95	0,94	0,98	0,757
<b>75/125</b>	0,23	0,68	0,98	1,04	0,97	0,99	0,917

Fonte: illBruck (2011)

### **2.3.2 Isolamento do ruído com materiais não convencionais**

Conforme Rocha e John (2003), a indústria da construção civil vem se mostrando grande absorvedora de resíduos da construção e demolição e agroindústria, por exemplo, através da inclusão de resíduos em compósitos de argamassa ou no concreto, gerando materiais inovadores. A substituição dos agregados ou de parte do cimento gera a redução da

extração de areia e brita no meio ambiente e a diminuição da energia gerada ao se produzir o cimento (CARVALHO, 2009).

Ademais, os ruídos de impacto nas edificações podem ser reduzidos através da utilização de resíduos sólidos em lajes, de acordo com Paz et al. (2002) e Hax (2002), observando também critérios importantes como a questão estrutural, resistência ao fogo, uso e durabilidade.

### **2.3.2.1 Compósitos com resíduos – adição de resíduos em argamassa**

Segundo Melo (2007), compósitos são materiais constituídos a partir da união de outros elementos com o objetivo de criar um novo material com propriedades superiores às dos seus componentes, isoladamente. A construção tradicional emprega muitos compósitos, especialmente em argamassas e no concreto.

Os compósitos originados de argamassas e concretos podem receber fibras e/ou partículas de origem minerais, sintéticas (polietileno) ou de biomassa vegetal. Atualmente, essas pesquisas têm evoluído e demonstrado melhoras nas condições de resistência à tração do compósito. Fibras naturais oriundas de vegetais ou artificiais (minerais, poliméricas, metálicas) estão sendo adicionadas a matrizes cimentícias, gerando alterações importantes no comportamento da argamassa. Podem apresentar maior durabilidade, tenacidade e maior resistência a impactos (MELO, 2007).

Na pesquisa realizada por Branco; Godinho; Tavares (2010) foram produzidas argamassas utilizando diferentes tipos de agregados leves (poliestireno expandido, argila expandida e granulado de cortiça expandida), tendo em vista a avaliar o desempenho na redução dos níveis sonoros provocados por impacto. O uso dos granulados de cortiça demonstrou um melhor desempenho, devido principalmente à alta flexibilidade e resiliência do material.

### **2.3.2.2 Argamassa com adição de partículas vegetais**

As argamassas feitas com compósitos de fibra vegetal e base cimentícias apresentam baixa massa específica, têm a capacidade de suportar grandes deformações e apresentam-se como bons isolantes termo-acústicos. Podem ser utilizadas para regularizar contrapisos, em enchimentos de lajes e como argamassa de revestimento (MELO, 2007).

Enfatizando os compósitos, aparecem pesquisas criando o “biokreto”, que corresponde a um concreto leve, conseguido através da mistura de cimento, areia, partículas

de bambu, madeira, bagaço de cana, resíduos agrícolas ou casca de arroz. Este compósito pode ser usado na produção de pavimentos, bancos, telhas onduladas, coletores solares e placas hexagonais, além de servir como contrapiso (MELO, 2007).

Nos compósitos cimentícios com adição de fibras vegetais é importante obter uma distribuição homogênea da fibra, para que ocorra um bom envolvimento da partícula pelo cimento e, dessa maneira, gerar boa resistência mecânica e proteção para evitar a deteriorização das fibras (COUTTS E WARDEN, 1988).

De acordo com Pimentel (2004), as fibras naturais podem ser utilizadas de duas maneiras: as fibras curtas, como um agregado extra, misturado de forma aleatória e, as fibras longas, dispostas manualmente nos moldes, em camadas intercaladas com argamassa.

#### 2.3.2.2.1 Compósitos com resíduo de madeira

Segundo Melo (2007), os compósitos de cimento-madeira podem receber o acréscimo de aditivos químicos que têm como finalidade acelerar o processo de pega do cimento e excluir os efeitos indesejáveis das substâncias da madeira.

De acordo com Latorraca (2000), a composição química da madeira afeta o tempo de hidratação do cimento, retardando a pega do composto cimento-madeira. A elevação do pH pode causar uma redução de massa e mudanças de dimensões dos compósitos, ocorrendo, conseqüentemente, um aumento da instabilidade devido a mudanças de dimensões. Desta forma, nem todas as espécies de madeira são adequadas para a produção de compósitos de cimento-madeira.

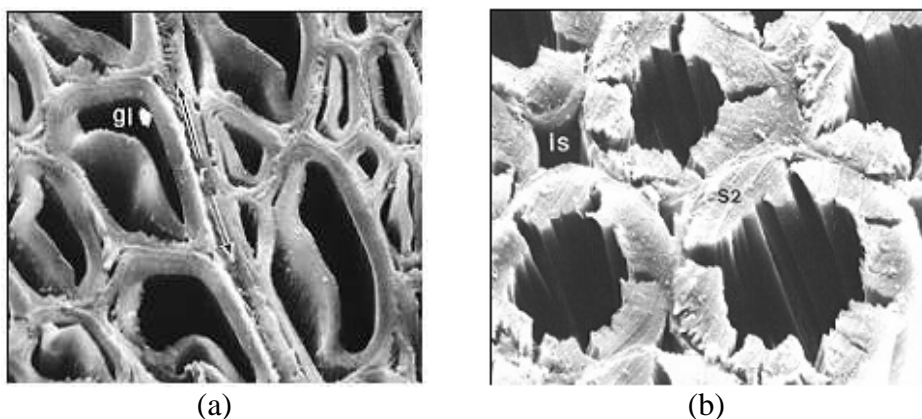
Carvalho (2000) afirma que a eventual incompatibilidade do cimento com a madeira ocorre devido à presença de hemiceluloses solúveis e de açúcares simples que, quando combinados com íons metálicos, provocam a incompatibilidade entre a madeira e o cimento. Conforme Rocha (2004), apud Gazola (2007), para extrair os elementos nocivos à pega, o componente ligno-celulósico deve ser submetido a um tratamento de lixiviação, para, desta forma, obter-se um compósito de madeira adequado ao uso. Estes tratamentos podem ser físicos (autoclave, revestimento superficial, mineralização da serragem, uso de pozolanas naturais), térmicos (torrefação e auto-hidrólise) e químicos (tratamento das ligações O-H e tratamento com dióxido de carbono).

A geometria e densidade das partículas da madeira também influenciam nas propriedades físico-mecânicas dos compostos de cimento-madeira (CASTRO, 2000, apud LATORRACA, 2000). Para Dacosta et al. (2005), a geometria das partículas possui uma

reação quase linear com o índice de inibição de pega, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula, maior o índice de inibição. Gazola (2007) afirma que a presença da casca de árvores nos resíduos pode resultar na diminuição da resistência das chapas.

Por conseguinte, um dos grandes problemas encontrados na produção do compósito cimento-madeira é a adesão entre os compostos, que é influenciada pelo material vegetal que está sendo empregado. Frequentemente, a madeira proveniente de coníferas é a mais usada na fabricação dos painéis, principalmente por possuírem propriedades químicas, que as tornam mais compatíveis com o cimento, não ocasionando inibição da pega e do endurecimento (HACHMI e CAMPBELL, 1989).

Cada espécie de madeira apresenta um arranjo próprio de células que compõem o tecido lenhoso (Figura 18). A camada gelatinosa (gl) de uma *Dicotiledônea* pode ser observada através da microfotografia eletrônica (Figura 18a). Pela microfotografia eletrônica de lenho de compressão de uma conífera (Figura 18b) observa-se a presença de cavidades na camada S<sub>2</sub>, o aspecto arredondado e os espaços intercelulares (is) (GAZOLA, 2007).



**Figura 18: Microfotografia eletrônica do lenho: (a) *Dicotiledônea*; (b) *Conífera*.**

Fonte: Klock et al. (2005) apud Gazola (2007)

Segundo Latorraca (2000), os painéis de cimento-madeira foram inicialmente desenvolvidos na Alemanha em 1914. Devido às suas propriedades e resistência ao ataque de fungos e cupins e fácil trabalhabilidade, os painéis foram bem aceitos no mercado consumidor brasileiro. Nas residências, essas placas encontram utilização em paredes de casas pré-fabricadas, bancadas, paredes divisórias internas, portas corta-fogo e forros. O painel cimento-madeira também é utilizado em pavilhões, estádios e edifícios públicos, sendo empregados em banheiros, lavanderias e cozinhas.

Em pesquisa desenvolvida por Silva et al. (2005), foram consideradas as propriedades físicas e mecânicas de painéis de cimento com *Eucalyptus urophylla*, alterando-se a relação madeira-casca com cimento Portland. Como consequência, observou-se que os painéis produzidos com até 10% de casca demonstraram resultados parecidos com os painéis produzidos com 100% de partículas de madeira para as propriedades mecânicas. Mantiveram-se as propriedades físicas como o inchamento em espessura e a absorção de água, para misturas de até 25% de casca. Já os painéis confeccionados com 100% de casca apresentaram um menor desempenho em todas as propriedades analisadas.

Mori et al. (2007) estudou a compatibilidade química da madeira e cascas tratadas e não tratadas quimicamente (realizado com solução de hidróxido de sódio) de *Eucalyptus grandis* com o cimento Portland. O estudo demonstrou que a madeira *Eucalyptus grandis* apresentou uma moderada aptidão ao cimento, as cascas tratadas apresentaram uma boa combinação com o cimento e as cascas não tratadas apresentaram baixa compatibilidade com o cimento.

Outro exemplo de compósito de cimento-madeira foi o trabalho realizado por Iwakiri; Prata (2008) onde se avaliou a utilização de dois tipos de madeira, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, para produção de painéis cimento-madeira. Utilizou-se para tanto o cimento Portland como aglutinante mineral e partículas de madeira sem tratamento, e com tratamentos em água fria e água quente. Como referência utilizou-se a madeira de *Pinus taeda*. Observou-se que não houve necessidade de tratamento de partículas para as madeiras estudadas para produção dos painéis de cimento-madeira. Os compósitos produzidos com madeira de *Eucalyptus grandis* obtiveram os melhores resultados em comparação aos painéis referência e bibliografia consultada, nas propriedades mecânicas e de estabilidade dimensional, já os painéis produzidos com a madeira de *Eucalyptus dunnii*, apresentaram baixos valores de propriedades mecânicas.

Percebe-se que as fibras de madeira podem intervir no tempo de hidratação do cimento e na redução da massa do compósito. Sendo assim, é importante observar o tamanho das partículas de madeira, pois quanto menor o seu tamanho, maior será o índice de inibição da pega. A utilização de partículas maiores, como cascas, pode reduzir as propriedades mecânicas das chapas de cimento-madeira. Portanto, a utilização em pequenas quantidades é aconselhada.



#### 2.3.2.2.2 Compósitos com casca de arroz

De acordo com Souza et al. (2003) a utilização direta da casca de arroz é limitada devido ao seu caráter altamente abrasivo, resistência à degradação, baixa densidade (bom para a absorção acústica) e alto teor de cinzas. Entretanto, Pfitscher (2004) e Chamma (2004) afirmam que a casca de arroz pode ser utilizada como material isolante térmico, na geração de calor e na forma de aglomerados (misturado a resinas fenólicas), possui características benéficas, como boa resistência mecânica e ao ataque de água e cupins, bom isolamento térmico e acústico. Nesta forma, os compósitos podem ser utilizados em pisos, divisórias, forros e isolamento termo-acústico.

Estudo realizado por Beraldo; Tojal (2001) utilizou a casca de arroz na forma natural, sem queima ou trituração, em substituição ao agregado mineral graúdo, com o objetivo de obtenção de blocos vazados e pisos. Os blocos demonstraram-se adequados para construções, porém sem funções estruturais. A confecção dos pisos mostrou-se interessante, e os autores sugerem que podem ser um material alternativo que venha a substituir os materiais convencionais utilizados em moradias populares.

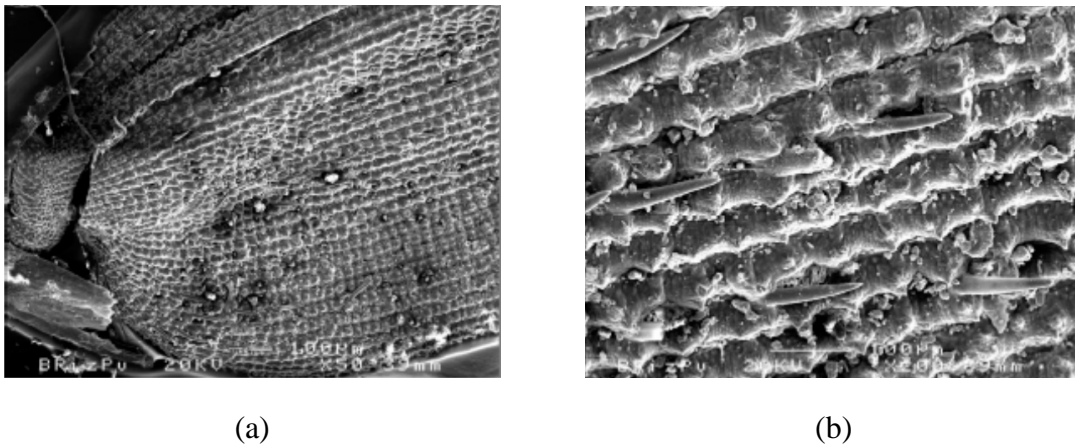
Guimarães; Tubino (2004) propuseram a utilização de casca de arroz como adição em argamassa de enchimento de painéis tipo sanduiche para paredes externas de casas de madeira, para melhorar o desempenho térmico das habitações. Todos os painéis confeccionados propiciaram reduções de temperatura muito próximas de setenta por cento. Desta forma, os autores concluíram que é possível aplicá-los como alternativa para argamassas de enchimento.

Outro exemplo de adição de casca de arroz em compósitos com cimento é o trabalho realizado por Rossi; Cardoso; Beraldo (2005) tendo como objetivos confeccionar placas de argamassa de cimento, areia e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica para avaliação de desempenho térmico. As placas mostraram-se bons isolantes térmicos. Os autores afirmam que o uso da argamassa de cimento, areia e cal é indicado para revestir a parte inferior das placas.

Ferreira; Gobo; Cunha (2008) estudaram a incorporação de casca de arroz em tijolos de solo-cimento. O estudo demonstrou a possibilidade de uso destes resíduos sem o comprometimento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência e à absorção de água dos tijolos de solo-cimento, com a adição da casca de arroz, proporcionando valores elevados, nos teores correspondentes, em todas as idades de cura.

Por fim, Pauleski et al. (2007) estudaram a viabilidade da utilização da casca de arroz e de partículas de madeira para produção de painéis. O estudo utilizou como agente ligante o polietileno de alta densidade (PEAD). Os resultados encontrados demonstram que os painéis com casca de arroz e partículas de madeira puras ou misturadas apresentaram boa qualidade comparados com os painéis convencionais, evidenciando, assim, a viabilidade de uso desses materiais na confecção desse tipo de painel.

Através de microscopia eletrônica de varredura da casca de arroz (Figura 19), observa-se que a sílica se concentra na parte mais externa da casca (JAUBERTHIE et al., 2000 apud KIELING (2009). Stroeven et al. (1999) apud Kieling (2009) afirma que isto ocorre devido à evaporação, polimerizando a sílica em uma membrana silico-celulósica.



**Figura 19: Micrografia da casca de arroz: (a) aumento de 50x; (b) aumento de 200x**

Fonte: Jaubertie et al. (2000) apud Kieling (2009)

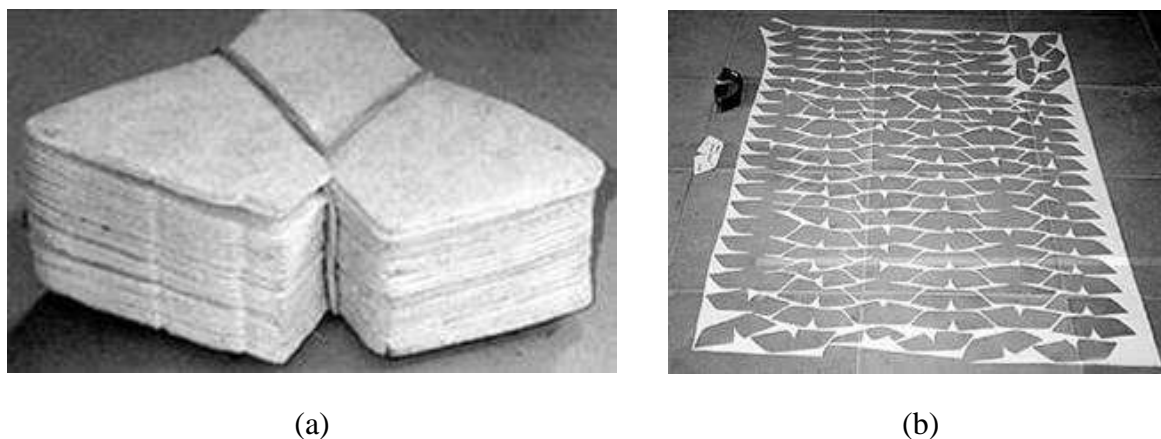
Concluí-se que a casca de arroz, na forma natural, pode ser utilizada em blocos vazados e pisos, porém sem função estrutural. Outra alternativa é no uso em argamassas de revestimento e produção de painéis com características de isolamento térmico e acústico.

### **2.3.2.3 Compósitos com contraforte de calçado**

Uma pesquisa realizada unindo a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), o Centro Instituto Brasileiro de Couro, Calçados e Artefatos (IBTeC), e com quatro empresas (Artecola, Bidim, Boxflex e Clasil) fornecedoras de matéria-prima ao setor calçadista, desenvolveu um compósito que agrega resíduos do contraforte de calçados ao gesso. Foi desenvolvida uma alternativa de reciclagem para o resíduo calçadista, realizando análises para caracterização do resíduo, estipulando possíveis matrizes nas quais o resíduo pode ser incorporado e, por conseguinte, caracterizando os compósitos resultantes. O

compósito estudado demonstrou-se superior em ductibilidade, se comparado a sua matriz e propriedades semelhantes a do gesso acartonado (KAZMIERCZAK et al., 2003).

O contraforte é um material de reforço colocado na parte posterior do calçado, possuindo função estrutural e estática que serve para preservar a forma e a aparência original do mesmo (Figura 20). O contraforte mantém o formato e sustenta a região no calcanhar dos pés (HARVEY, 1992).

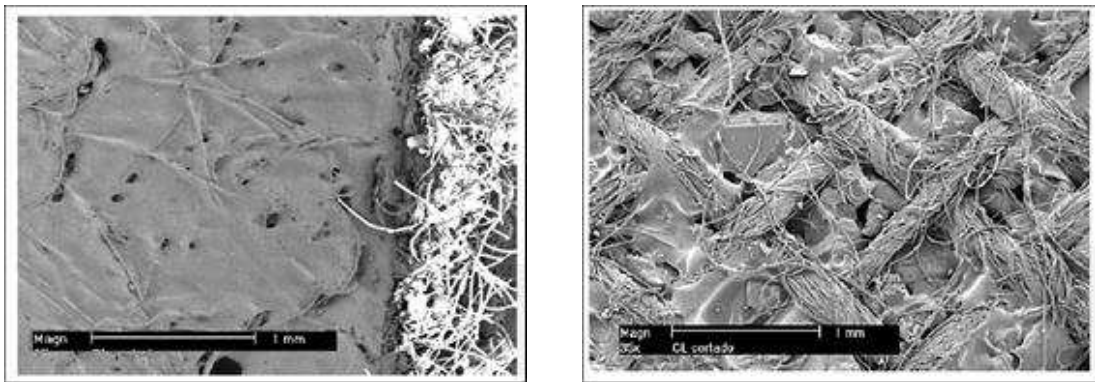


**Figura 20: Contraforte de calçado: (a) vista em detalhe das peças de contrafortes já cortadas; (b) resíduo das placas de contraforte gerado na operação de corte das peças**

Fonte: Kazmierczak et al. (2003).

Existem dois tipos de contraforte à venda no mercado brasileiro. Um possui, em sua composição, uma manta com tecido, e o outro não. Este último, por sua vez, chamado de contraforte termoplástico empregado, é o mais utilizado no Brasil e seu componente principal é à base de polímeros, sendo impregnado com poliéster, de filamentos contínuos e de baixa densidade. A base do material do contraforte é um tereftalato de poliéster obtido por policondensação de derivados do petróleo. O principal fornecedor do poliéster é a empresa Bidim (KAZMIERCZAK et al., 2003).

A composição da microestrutura varia de acordo com o tipo de contraforte. O contraforte termoplástico impregnado apresenta fibras sem orientação, embebidas pela resina (Figura 21a). O contraforte termoplástico laminado apresenta fios entrelaçados, com um desenho padrão das fibras torcidas, possuindo resina entre os espaços (Figura 21b). Com o processo de moagem, as fibras são alteradas, desorientando os fios do tecido (Figura 22a e b). No contraforte laminado pode-se notar uma orientação das fibras (Figura 22b) (KAZMIERCZAK et al., 2003).

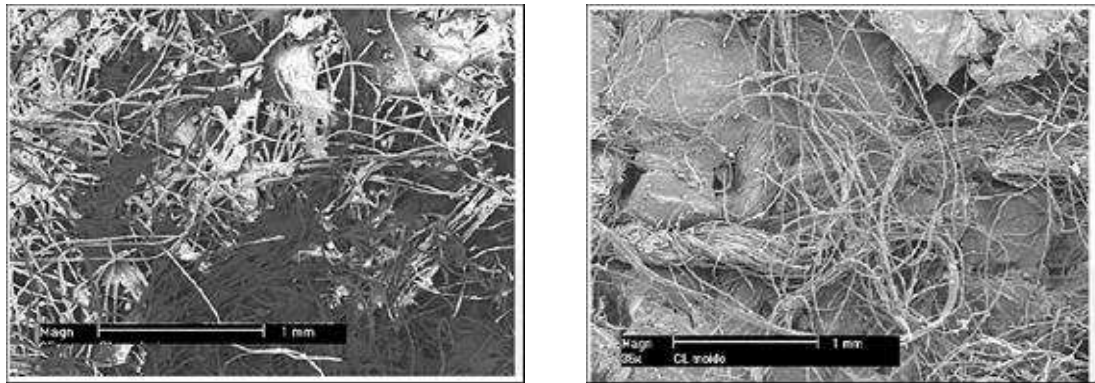


(a)

(b)

**Figura 21: Contraforte termoplástico: (a) impregnado (não tecidos); (b) laminado (tecidos). Aumento de 35x em MEV**

Fonte: Kazmierczak et al. (2003).



(a)

(b)

**Figura 22: Contraforte termoplástico: (a) impregnado moído (não tecidos); (b) laminado moído (tecidos). Aumento de 35x em MEV**

Fonte: Kazmierczak et al. (2003).

Foi observado que os teores de adição (0%, 10%, 15% e 20%) e o tipo de contraforte foram fatores significativos e influenciaram diretamente na resistência à compressão do compósito. Este demonstrou comportamento à compressão similar aos materiais fibrosos, apresentando resistência inferior à resistência de compressão da pasta-matriz. Isso se deve ao aumento da porosidade do compósito devido à adição das fibras (KAZMIERCZAK et al., 2003).

No âmbito da mesma pesquisa, Kern (1999) estudou a viabilidade da reciclagem do resíduo de contraforte de calçado para gerar um compósito para uso na construção civil. A autora analisou dois tipos de contrafortes termoplásticos, o impregnado e o laminado, adicionando-os à matriz de gesso nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em massa, em relação à massa do gesso. O resíduo passou por um processo de moagem para adequá-lo à

adição. Kern realizou a caracterização do resíduo, análise das suas propriedades e formas de utilização, além das análises das propriedades mecânicas, nos estados fresco e endurecido do compósito.

Os resultados encontrados demonstram que, quando foram empregados teores mais elevados de resíduos (20% e 25%), ocorreu um maior incremento de resistência. Houve uma diminuição da resistência a compressão da matriz de gesso, entretanto a resistência ao impacto e a flexão aumentaram de forma significativa, em todos os teores de adição, apresentando deformação plástica considerável. A relação água/gesso mais indicada foi a de 0,60, tendo em vista a melhor trabalhabilidade da pasta (KERN, 1999).

Percebe-se que o contraforte de calçado adicionado à matriz de gesso apresenta resultados de superior ductibilidade, quando comparado à sua pasta matriz. Concentrações de 20% e 25% de contraforte moído indicam um aumento na resistência (ao impacto e à flexão) o que implica em resultados satisfatórios, gerando compósitos possíveis de serem utilizados na construção civil, além de uma alternativa de reciclagem para um resíduo gerado em grande quantidade no estado do Rio Grande do Sul.

### **2.3.3 Métodos para medição das propriedades acústicas**

O coeficiente de absorção sonora real é difícil de ser medido diretamente, porque ele depende de como o material foi instalado, do ângulo de incidência sonora e das características do recinto (SALVO et al., 2005).

Para medir esse parâmetro acústico dos materiais, existem três métodos experimentais diferentes:

- a) Câmara Reverberante de Grandes Dimensões e de Pequenas Dimensões;
- b) Método “*in Situ*”;
- c) Tubo de Impedância.

#### **2.3.3.1 Câmaras reverberantes**

Normalmente, para avaliar os materiais em ambientes fechados, usam-se as curvas de absorção sonora para campo difuso. Este campo difuso ocorre em uma determinada área no interior do ambiente, que recebe energia sonora em todas as direções, ao mesmo tempo e com igual probabilidade. Assim, para medir o coeficiente de absorção sonora neste campo, utiliza-se um recinto especial, denominado Câmara Reverberante (OLIVEIRA; TEODORO, 2005).

Este método é bastante utilizado e é regulado pela norma ISO 354 (ISO, 1985). A câmara reverberante apresenta-se de duas formas diferentes: a câmara reverberante de grandes dimensões e a de pequenas dimensões. Vários estudos utilizam esse método de pesquisa em acústica, tais como Branco; Godinho; Tavares (2010), Ferreira Neto; Bertili (2010), Godinho; Pereira (2008), Masgalos (2008), entre outros.

#### 2.3.3.1.1 Câmara reverberante de grandes dimensões

Através deste método, consegue-se medir a absorção sonora com objetos como cadeiras, mesas, quadros, além dos materiais utilizados como revestimentos. De acordo com Oliveira; Theodoro (2005), as câmaras reverberantes de grandes dimensões devem possuir um volume mínimo que varia de  $150 \text{ m}^3$  a  $200 \text{ m}^3$ . Recomenda-se que a câmara atenda à condição da Equação (6):

$$L_{\max} < 1,9 V^{1/3} \quad (6)$$

Onde:

- $L_{\max}$  é o comprimento da maior linha reta que se consegue medir no interior da câmara (m).
- $V$  é o volume da câmara ( $\text{m}^3$ );

Um dado que deve ser observado é o fato de a câmara não poder apresentar duas dimensões iguais ou múltiplas entre si, para que assim, seja possível conseguir uma distribuição uniforme de frequências naturais (baixas frequências). Em geral, as paredes não são paralelas (BISTAFA, 2006; GERGES, 2000).

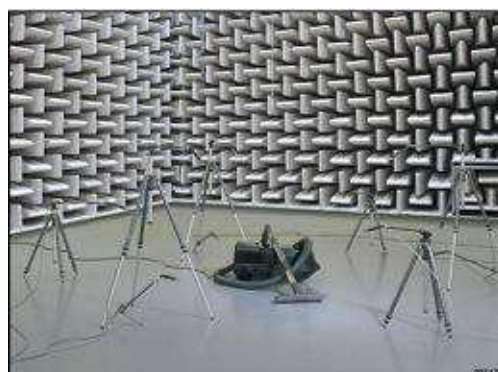
As amostras devem possuir formas retangulares com relação de comprimento e largura entre 0,7 e 1m, (Figura 23a) como, por exemplo, nas câmaras de  $200 \text{ m}^3$  a  $300 \text{ m}^3$ , as amostras devem ter aproximadamente entre 10 a  $12 \text{ m}^2$  de dimensões. Estas devem estar afastadas de, no mínimo, um metro das bordas das paredes da câmara (Figura 23b).



**Figura 23: Câmara reverberante: (a) amostra; (b) medição do tempo de reverberação na posição da fonte e do sonômetro.**  
 Fonte: MAXIT (2011)

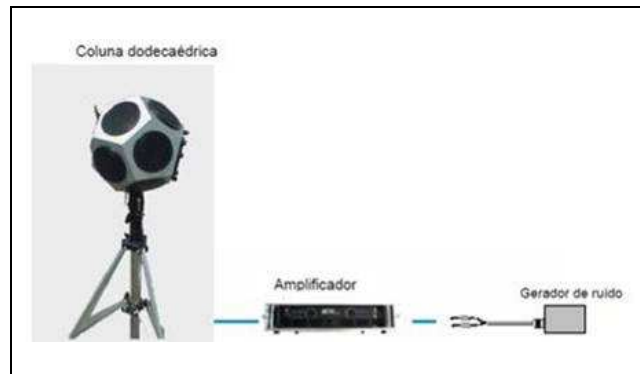
Quando se colocam as amostras diretamente sobre a superfície da câmara, as bordas devem ser cobertas por um material que reflita as ondas e se ajuste perfeitamente com as amostras, para não interferir no experimento. No caso de simulação de um forro suspenso, onde é necessária a existência de um espaçamento de ar, é recomendada a construção de paredes laterais perpendiculares à superfície de ensaio (OLIVEIRA; TEODORO, 2005).

Para determinar as curvas de absorção sonora, é necessário realizar as medidas de tempos de reverberação, comparando os da câmara vazia com as da câmara que contém dispostas as amostras no piso. As condições da câmara são representadas por médias espaciais dos tempos de reverberação (Figura 24).



**Figura 24: Exemplo de aplicação com a aquisição simultânea de níveis sonoros em vários pontos (para avaliação de potência sonora de equipamentos em câmara anecoica)**  
 Fonte: Mateus (2008)

A fonte de geração sonora típica é uma fonte omnidirecional (Figura 25)



**Figura 25: Fonte de ruído aéreo onidirecional**  
Fonte: Mateus (2008)

#### 2.3.3.1.2 Câmara reverberante de pequenas dimensões

Normalmente, quando se deseja realizar uma análise rápida do desempenho de soluções construtivas na redução da transmissão de ruídos, e também para caracterizar uma solução técnica ou comparar duas distintas soluções, utiliza-se o método de ensaio de amostras em câmaras de reverberação de pequenas dimensões (BRANCO; GODINHO; TAVARES, 2010).

Estas câmaras são menores que as citadas anteriormente, podendo variar seu volume interior de  $3\text{m}^3$  a  $70\text{m}^3$ . Por reduzir os custos e possibilitar rápida execução e análise dos materiais, essas câmaras menores se adaptam perfeitamente às distintas necessidades dos pesquisadores. O método foi bastante empregado em trabalhos na Universidade de Coimbra, Portugal (MASGALOS (2008); SILVA; GODINHO; PEREIRA (2008); BRANCO; GODINHO; TAVARES (2010)) e em universidades brasileiras como a Universidade de Santa Maria, (PAIXAO E GERGES, 2004), Universidade Estadual de Campinas, (FERREIRA NETO; BERTOLI, 2010), entre outras.

A câmara utilizada por Branco, Godinho e Tavares (2010) é de pequenas dimensões ( $1,4\text{m} \times 1,3\text{m} \times 1,5\text{m}$ ), com volume de  $2,73\text{m}^3$ . A câmara foi construída em concreto armado, com espessuras das paredes de  $0,1\text{m}$ . A laje superior, também de concreto, é removível, para facilitar o acesso, e tem dimensões em planta de  $1,5\text{m} \times 1,6\text{m}$  e  $0,06\text{m}$  de espessura. A câmara possui uma abertura ( $0,5\text{m} \times 0,5\text{m}$ ) em uma das faces da parede lateral, fechada com uma porta, tipo sanduíche, com duas camadas de gesso e uma membrana asfáltica de  $4\text{mm}$  de espessura. Uma membrana de borracha isola a câmara do pavimento do laboratório e outra membrana localiza-se na laje superior (aglomerado de cortiça,  $5\text{mm}$ ), vedando acusticamente as juntas lajes-parede e isolando a câmara de ruídos externo. A Figura 26 ilustra a câmara (BRANCO; GODINHO; TAVARES; 2010).





**Figura 26: Conjunto de equipamentos de ensaio: (a) câmara acústica; (b) fonte de ruídos de impacto; (c) microfone.**

Fonte: Branco; Godinho; Tavares (2010)

As dimensões da amostra e a localização da mesma são importantes de serem analisadas, pois provocam alterações nas curvas de absorção sonora. Para comparar resultados entre diferentes soluções construtivas, é necessário que as amostras possuam as mesmas dimensões. As amostras utilizadas por Branco; Godinho; Tavares (2010) em argamassa com agregados leves possuíam espessura de 4 cm e três dimensões distintas em planta: 0,5m x 0,5m, 0,7m x 0,7m e 0,9m x 0,9m. Já Silva, Godinho; Pereira (2008) apresentaram amostras de aglomerado de cortiça negra nas dimensões 1m x 0,5m e 1m x 1m. Os dois estudos utilizaram a mesma câmara (1,4m x 1,3m x 1,5m).

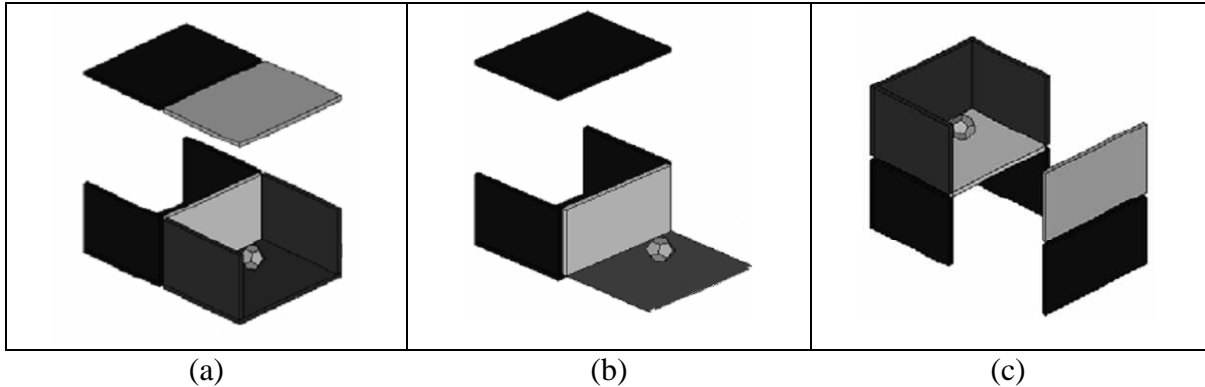
Em ensaios realizados por Ferreira Neto; Bertoli (2010), uma câmara de reverberação com 21m<sup>3</sup> de volume, determinou o desempenho acústico de grupos de paredes de alvenaria. O estudo visava compreender o isolamento sonoro a ruídos que ultrapassam a parede que divide duas unidades habitacionais, tal como em casas geminadas. Dois grupos de alvenaria foram estudados: grupo I, com tijolos de espessura de 0,11m; e grupo II, com tijolos variando de 0,14m a 0,15m de espessura. A pesquisa comparou dados de estudos brasileiros com estudos portugueses e concluiu que os resultados do desempenho acústico das paredes estão aquém do recomendado pelos critérios brasileiros para o uso como paredes geminadas.

Esse método é interessante, mas exige amostras de tamanho considerável, dificultando a exploração de um conjunto amplo de compósitos.

### **2.3.3.2 Método “*in situ*”**

O método “*in situ*” é realizado nas próprias edificações, já construídas. Este método apresenta duas formas distintas de medições: para o ruído aéreo e para o ruído de impacto (GERGES, 2000). Os procedimentos para a realização das medições “*in situ*” dos coeficientes de isolamento sonoro são especificados pela norma ISO 140-4 (ISO,1998b) entre

cômodos Figura 27a e c (há um cômodo emissor e outro receptor) e pela ISO 140-5 (ISO,1998c) para fachadas Figura 27b, utilizando o ruído de tráfego como fonte sonora nas fachadas.



**Figura 27: Detalhe das medições “in situ”:** (a) Medição entre cômodos; (b) Medição nas fachadas; (c) Medição entre cômodos (pisos)  
Fonte: Ferreira; Zannin (2007)

Segundo Ferreira e Zannin (2007), certos critérios devem ser observados para realização dos testes, como:

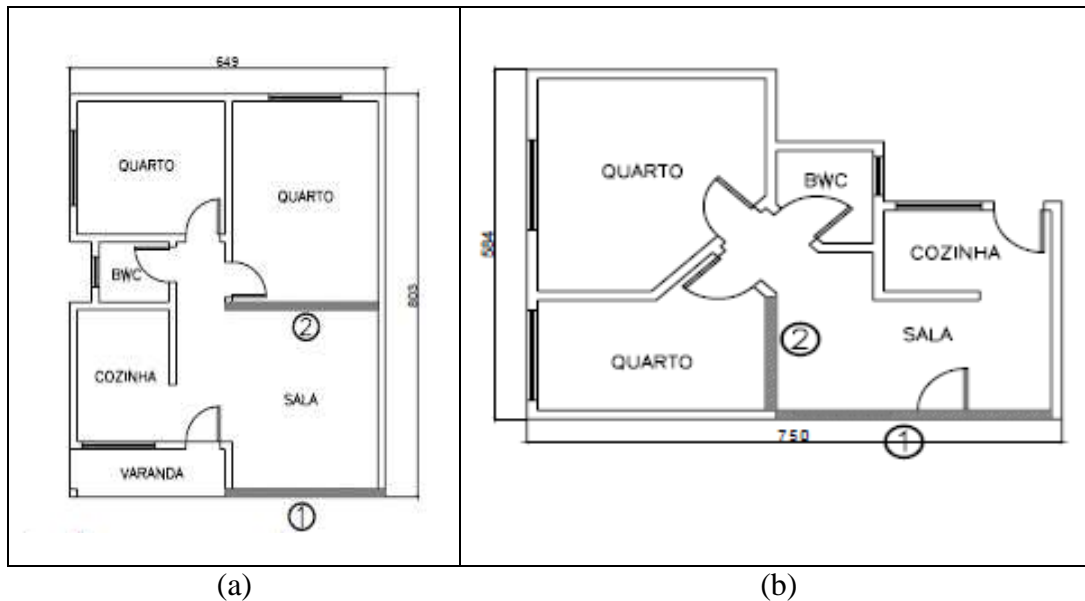
- Nas salas vazias, dimensões iguais (paredes), devem ser utilizados difusores sonoros;
- A fonte sonora deve gerar um campo difuso e a localização desta deve ser observada, para que isso ocorra, evitando a radiação direta sobre o elemento a ser medido;
- Vários pontos no interior da sala devem ser medidos e uma distância mínima de 0,5 m entre o microfone e a parede deve ser observada;

O ruído de fundo na sala receptora também deve ser medido. Se a diferença das medidas em cada ambiente ficarem entre 3 dB e 10 dB, os valores devem ser corrigidos pela tabela presente nas normas ISO 140-4 e ISO 140-5 (ISO, 1998).

As normas para medição estipulam distâncias mínimas entre a fonte e o microfone e entre o microfone e as demais superfícies. O número de pontos de medição em cada ambiente pode variar, sendo determinado em função das dimensões do recinto e das distâncias entre os equipamentos e superfícies. Nas fachadas, o microfone deve ficar posicionado a uma distância de dois metros da parede, segundo as normas ISO 140-4 e ISO 140-5 (ISO, 1998).

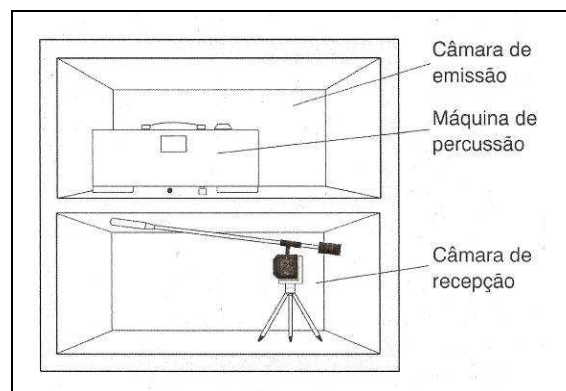
A Figura 28 demonstra a pesquisa realizada por Krüger; Zannin (2006), em Curitiba, avaliando a fachada e os cômodos da sala e do quarto em uma edificação de habitação social. As hachuras se referem às partições avaliadas: fachada (1) – Medições

conforme ISO 140-5 e partição interna – parede divisória entre dormitório e sala (2) – Medições conforme ISO 140-4 (ISO 140-3; ISO 140-4, 1998).



**Figura 28: Determinação do coeficiente de isolamento acústico de divisória interna e da fachada**  
Fonte: Krüger; Zannin (2006)

Para o ruído de impacto, o método ISO/EM possibilita caracterizar o isolamento sonoro a sons de impacto, correspondendo à Norma ISO 140-7(1998), ISO 717-2 (1996), ISO 354(2003) e ASTM E 989(1989) para ensaios “*in situ*”. Na Figura 29, observa-se o esquema de configuração de simulação de teste (GERGES, 2000):



**Figura 29: Esquema de configuração de teste para ensaios “*in situ*”.**  
Fonte: Gerges (2000)

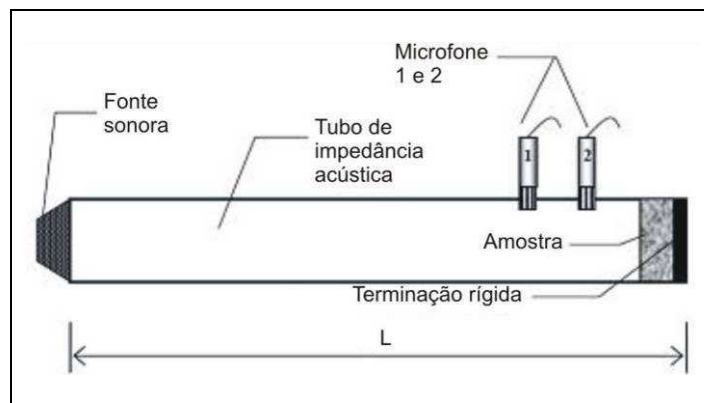
A máquina de ruído de impacto deve ser posicionada em diferentes posições, distribuídas no piso do pavimento superior (Figura 30).



**Figura 30: Máquina geradora de ruído de impacto – Padrão ISO 140-7**  
 Fonte: Ferraz (2006)

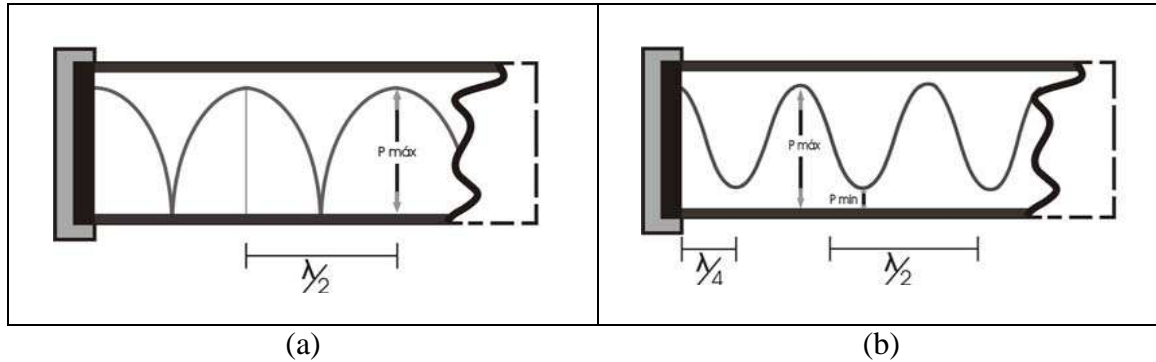
### 2.3.3.3 Tubo de impedância

O tubo de impedância é utilizado com um alto falante colocado na extremidade de um tubo de seção transversal uniforme onde se produzem as ondas acústicas. Depois de alguns instantes, forma-se um padrão de onda estacionária. Na outra extremidade, é introduzida uma terminação rígida, para permitir o mínimo possível de absorção e transmissão pelas suas paredes, e a amostra de material em teste é colocada em frente a esta terminação (GERGES, 2000) (Figura 31).



**Figura 31: Tubo de impedância acústica**  
 Fonte: Gerges (2000)

Segundo Gerges (2000), ao colocar um material refletor na extremidade do tubo, as ondas de pressão estabelecem um padrão de ondas estacionárias conforme Figura 32a. Quando se insere um material absorvente, observa-se uma variação na relação de fase entre as ondas incidentes e refletidas, produzida pela impedância acústica do material, originando um padrão de onda estacionária como na Figura 32b (A fonte sonora está à direita e o material em teste à esquerda, nas Figura 32a e b).



**Figura 32: Representação esquemática do tubo com: (a) terminação perfeitamente refletora; (b) um material absorvente**  
 Fonte: Gerges (2000)

No tubo de impedância, as ondas propagam-se de forma plana. Com este equipamento há a possibilidade de testar amostras de tamanho reduzido, calculando a impedância acústica normal dos materiais a partir da medição do coeficiente de reflexão. Esse cálculo é determinado pelos métodos SWR e da função de transferência, sendo padronizados pelas Normas ASTM C 384 e ISO 10534-2 respectivamente (ASTM C 384, 1999; ISO 10534-2, ISO 1998).

No método SWR as ondas planas são excitadas por tons puros abaixo da frequência de corte que é dada pela seguinte Equação (7):

$$f_c = 1,84c / \pi d \quad (7)$$

Onde:

- $f_c$  é a frequência de corte (Hz);
- $d$  é o diâmetro do tubo (m).

Segundo Gerges (2000), o campo sonoro que se forma dentro do tubo de impedância é composto por duas ondas planas, sendo uma incidente e outra reflexiva. A relação matemática entre as pressões acústicas destas ondas está determinada na Equação (8):

$$P = P_i + P_r = A_1 \cos(\omega t - kx) + B_1 \cos(\omega t + kx) \quad (8)$$

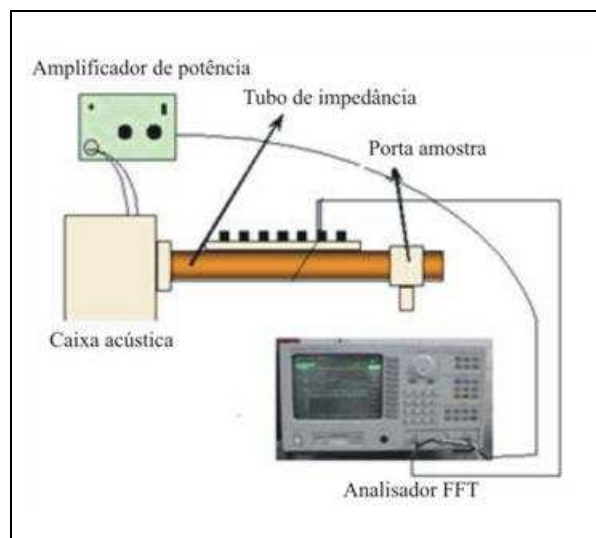
Onde

- $P$  é a pressão acústica total
- $\omega$  é a frequência circular (rad/s)
- $t$  é o tempo decorrido

- $x$  é a distância entre o microfone e a amostra (negativa)
- $k$  é o número de onda ( $k = \omega/c = 2\pi f/c$ )

No método SWR, utiliza-se um sistema de medição analógico, que fornece valores apenas para frequências discretas, porém, com a modernização das técnicas digitais de análise de sinais, surge o método de transferência que possibilita determinar o coeficiente de absorção de materiais com bandas de frequências contínuas (GERGES, 2000).

O método de transferência consiste em excitar o tubo com um ruído branco de banda larga. Em seguida, se mede a pressão sonora no seu interior, em duas posições diferentes, para averiguar o ruído que incidiu na amostra e o que foi refletido por ela. Os sinais verificados são encaminhados para um analisador digital de espectro de frequência e a função transferência entre eles é calculada. (MAFRA; SOEIRO; ALVES, 2005). Através dela, determina-se a curva de absorção acústica do material em função da frequência. Na Figura 33, observa-se uma representação esquemática do sistema.



**Figura 33: Esquema para medição da impedância acústica**  
 Fonte: Mafra; Soeiro; Alves (2005)

De acordo com Mafra, Soeiro e Alves (2005); Gerges (2000), as pressões incidentes e refletidas das ondas propagadas no interior do tubo podem ser calculadas, através do método de transferência, pelas Equações (9), (10) e (11):

$$P_i = Ae^{i(\omega t - kx)} \quad (9)$$

$$P_r = Be^{i(\omega t + kx)} \quad (10)$$

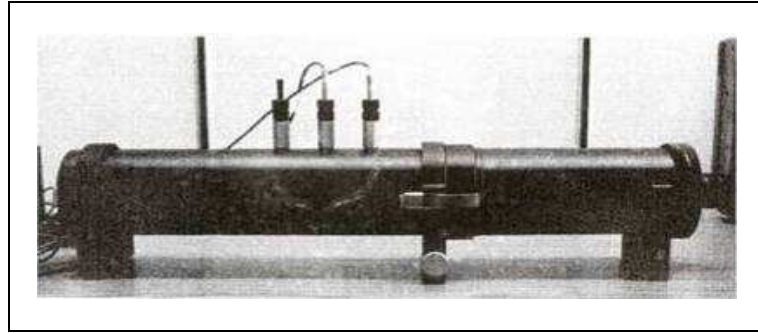
$$P = P_i + P_r \quad (11)$$

Sendo:

- $P_i$  é a pressão acústica incidente (complexa) [ $N/m^2$ ];
- $P_r$  é a pressão acústica refletida (complexa) [ $N/m^2$ ];
- $P$  é a pressão acústica total [ $N/m^2$ ];
- $A$  é a amplitude da onda incidente (real) [ $N/m^2$ ];
- $B$  é a amplitude da onda refletida (complexa) [ $N/m^2$ ];
- $\omega$  é a frequência circular [rad/s];
- $t$  é o tempo decorrido [s];
- $x$  é a distância entre o microfone e a amostra (negativa) [m];
- $k$  é o número de onda angular [rad/m].

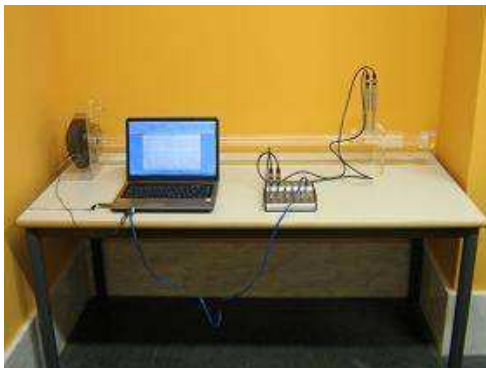
Oliveira e Teodoro (2005) argumentam que é recomendável usar apenas um microfone, para evitar qualquer erro sistemático de diferença de amplitude e de fase, tornando desnecessária a aplicação de funções de correção. Com a técnica de um microfone, este pode ser instalado num dispositivo que pode movimentar-se para frente e para trás, sobre um trilho, ou pode ser acomodado em orifícios pré-determinados, ao longo do tubo, captando o nível máximo e mínimo da pressão sonora.

O tubo de impedância é o método economicamente mais viável, rápido e simples, sendo possível adquirir o equipamento completo à venda no mercado, ou produzi-lo em laboratório. Um dos equipamentos mais utilizados em pesquisa é da marca Brüel e Kjaer (Figura 34).



**Figura 34: Tubo de impedância acústica fabricado pela Brüel e Kjaer. Modelo 4206**  
 Fonte: Brüel e Kjaer (2011)

Porém em função do custo de aquisição, existem vários exemplos de tubos de impedância construídos por pesquisadores de todo o mundo como: Sanchis (2008) na Espanha, Oliveira; Theodoro (2005), Soeiro (2004) no Brasil; e Silva; Godinho; Pereira (2008) em Portugal (Figura 35a e b e Figura 36).



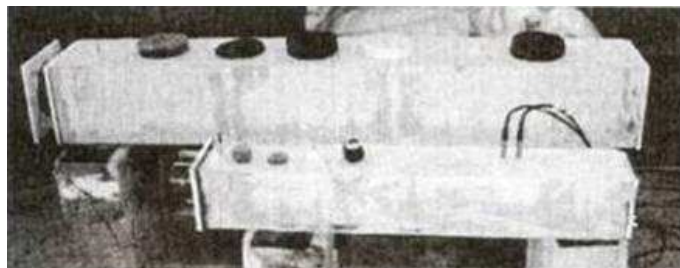
(a)



(b)

**Figura 35: Tubos de impedância construídos: (a) equipamento de medida com tubo de acrílico, Universidade Politécnica de Valência, Espanha; (b) bancada desmontada e os dutos de dimensões distintas, Universidade Federal do Pará, Brasil**

Fonte: (a) Sanchis (2008), (b) Soeiro (2004)



**Figura 36: Tubo de impedância construído pela Universidade de Coimbra, Portugal.**

Fonte: Silva; Godinho; Pereira (2008)

As partes que constituem um aparelho de tubo de impedância são:

- a. Gerador de sinais;



- b. Amplificador de sinais;
- c. Pré-Amplificador de microfone;
- d. Analisador de espectro;
- e. Caixa acústica com o alto-falante;
- f. Tubo de ondas estacionárias, com os pontos de acesso para o microfone;
- g. Microfone;
- h. A terminação rígida com porta-amostra, na qual é colocada a amostra a ser avaliada.

Para atestar o desempenho dos materiais em estudo, no que diz respeito ao atendimento das exigências de uso comercial, recomenda-se confeccionar amostras tanto dos materiais analisados como de um material acústico comercial, de fabricação no Brasil, para que se possa fazer uma comparação entre eles (MAFRA; SOEIRO; ALVES, 2005). Algumas das referidas amostras estão representadas na Figura 37.



(a)



(b)

**Figura 37: Painéis: (a) acústico comercial (35 mm de esp.); (b) de fibra de coco (50 mm de esp.)**  
Fonte: Mafra; Soeiro; Alves (2005)

As amostras devem ser compactas e de dimensões que se ajustem adequadamente ao diâmetro do tubo de impedância. Assim, as amostras são cortadas do material original que está em estudo, devendo encaixar-se perfeitamente nas seções transversais dos tubos. As espessuras e a densidade da amostra também podem variar (Figura 38).



**Figura 38: Amostra dos materiais empregados nos testes acústicos**

Fonte: Mafra; Soeiro; Alves (2005)

Apesar de o método de tubo de impedância ser um pouco restrito para caracterizar completamente a absorção de uma amostra, ele pode ser muito vantajoso para o desenvolvimento de novos materiais absorventes acústicos, pois possibilita uma avaliação das variações da absorção, relativamente segura, ao se comparar com materiais usuais (SALVO et al., 2005).

Dentre as três alternativas expostas, o tubo de impedância foi avaliado com sendo o método de ensaio mais adequado para esta pesquisa, pois, para realização do experimento, se faz necessária apenas uma amostra de pequena dimensão do material analisado, o que viabiliza testes com uma maior quantidade e variabilidade de material de amostras.

#### 2.3.3.3.1 Cuidados Técnicos

As normas ISO 10534-2/98 e ASTM C 384/99 regulam em detalhe os procedimentos, além do dimensionamento, conforme apresentado no item 2.3.3.3.

Segundo Boonew et al. (2008) e Choy; Huang (2008), a calibração do tubo, antes da realização da medição, melhora a precisão das medidas acústicas; portanto, se faz necessária essa prática, para eliminar a imprecisão dos dados. Quanto mais baixas forem as frequências, maior é o grau de incerteza; portanto, ter um material base, já conhecido, para calibrar o equipamento é uma prática importante (NAVACERRADA et al. 2008).

Outra observação foi o uso de apenas um microfone, sendo o método aconselhado pelos autores Choy; Huang (2007), pois elimina a necessidade de calibração, pareamento dos microfones e também a necessidade de fazer vários furos no tubo, os quais podem ocasionar a

perda/vazamento de ruído. Além disso, o método é mais barato, proporcionando respostas satisfatórias e bons resultados.

A amostra deve ajustar-se bem ao porta-amostra. Kino e Ueno (2007) estudaram os coeficientes de absorção sonora de incidência normal com diferentes diâmetros de amostras de fibra de vidro para avaliar os efeitos do tamanho das mesmas nos resultados das medições no tubo, sendo que o diâmetro adequado é capaz de reduzir a influência de ressonância, evitando lacunas de ar dentro do tubo. Os autores verificaram que, se o diâmetro for maior que o diâmetro interno do tubo, causará ressonância e, se a amostra possuir diâmetro menor, ocorrerão efeitos de fuga de som, ocasionando medidas incorretas. Portanto, o cuidado em cortar as amostras e observar a diferença entre o diâmetro das mesmas e o tubo são questões importantes para não gerar alteração nos valores de medição. Para reduzir os efeitos de ressonância e evitar vazamentos dos lados, as amostras devem ser preparadas com diâmetros entre 0,5 mm e 1 mm menor que o do tubo, segundo os autores citados acima.

A montagem do tubo também deve ser observada, pois é um dos fatores críticos que influenciam as medições. Navacerrada et al. (2008), enfatiza que as medições com dois dados distintos são aconselhados para comprovar a reprodutibilidade, validando, assim, a medição.

Silva, Godinho e Pereira (2008) analisaram que o tipo de campo sonoro influencia o comportamento dos materiais testados. Portanto, diferentes frequências ocasionam distintas reações. Concluíram, também, que a fonte sonora isolada produz mais conforto ao pesquisador, mas não influencia nos resultados.

Seybert (2002) recomenda que o anteparo, atrás da amostra, seja rígido, e que tenha um peso considerável.

#### 2.3.3.3.2 Revisão de estudos que utilizam o tubo de impedância

Inicialmente são demonstrados os estudos dos diferentes métodos empregados para a construção do tubo presentes na literatura. Em seguida, será apresentado um resumo dos materiais estudados nas diferentes pesquisas, com os coeficientes de redução de ruído (NRC) encontrados nas medições.

Foi realizada pesquisa bibliográfica, encontrando-se 43 trabalhos, entre nacionais e internacionais, que aplicaram a técnica do tubo de impedância, em experimentos com o objetivo de testar materiais quanto às suas propriedades acústicas. Observou-se que as

metodologias aplicadas pelos autores estudados foram as seguintes: *Transfer Function Method* com um ou dois microfones, (normas ISO10534-2/98+ASTM E1050/08) e SWR (norma ASTM C 384-99), sendo a primeira a mais aplicada, em 65% das pesquisas.

Atualmente, existem à venda, no mercado, tubos de impedância da marca B&K 4206 e outro da BSWA MPA416, porém muitos pesquisadores, aproximadamente 38%, optaram por construir seu próprio equipamento, devido aos altos custos. Salvo et al.(2010) relataram que o tubo de impedância confeccionado no laboratório da universidade custou cerca de 5% do valor encontrado à venda. Todavia existem ainda laboratórios, como o do INMETRO/RJ, que prestam serviço e realizaram ensaios para as pesquisas de Moreira (2009) e Oliveira (2010), utilizando um tubo da marca B&K 4206 adaptado. Por outro lado, os estudos mais recentes utilizam computadores para realizar funções que eram anteriormente desempenhadas por analisadores de frequências (por exemplo, SANCHIS, 2008, ver Figura 35).

Em se tratando das características físicas dos tubos analisados, observou-se que entre os formatos existentes, prismático e cilíndrico, o mais utilizado foi o cilíndrico, em quase 90% dos estudos. Quando se analisou o diâmetro interno dos tubos, estes variaram de 29 mm a 100 mm, sendo o último a maioria. Outra constatação foi que o material usado para a confecção dos tubos variou bastante, desde alumínio, PVC, acrílico e aço. Houve destaque para o aço, que foi o mais utilizado, com aproximadamente 55%, contra 23% do acrílico. O comprimento do tubo também apresentou diversas medidas, variando de 0,30m até 1,70m, sendo o mais utilizado pelos pesquisadores o comprimento de 0,98m.

As espessuras das amostras testadas nos tubos variaram de 5, 10, 15, 25, 30, 40, 50, 75 e 100 mm, destacando-se 5, 10, 20, 25, 30 e 50 mm. A apresenta um resumo das principais características dos tubos utilizados na literatura.

Tabela 4: Principais características dos tubos pesquisados na literatura

Fonte	Diâmetro interno (mm)	Material	Comprimento (m)	Marca/modelo	Faixa de frequências - intervalo	Método	Espessura das amostras (mm)
Barnard e Dayton, -	80	-	0,90	B&K 4206	050-1600	TF Method; Two micr	19 e 25
Barnard e Dayton, -	25 ou 29	-	1,05	B&K 4206	500-6400	TF Method; Two micr	-
Farina e Fausti, -	100	aço	-	B&K 4002	050-5000	SWR-ISO 10534	-
Farina e Fausti, -	100	aço	-	B&K 4206	050-5000	TF-ASTME 1050	-
Hu, -	66x66	aço	-	-	063-2000	TF; two sources	20, 25mm
Russell, -	100	-	0,98	B&K 4002	125-2000 - 1/3 oitava	SWR	-
Scott, 1946	44,5	latão	0,865	fab. Própria	100-5000	SWR	1"
Goodshall e Davis, 1960	100	aço	0,98	B&K 4002	125-4000	SWR-ASTM C 384/58	1/4"-2"
Yaniv, 1973	2x2" - d=57,3	plexiglass	1,83 - 6ft	fab. Própria	800, 1200, 1600	SWR	1" e 2"
Cheung, Jho, Kim 1995	100	-	0,98	B&K 4002	125-1000 - 1/3 oitava	SWR + multiple measures	10
O'Malley, 2001	50	-	1,00	fab. Própria	010-3200	TF Method; Two micr	13
Alba et al., 2003	-	acrílico	-	-	100-4000	-	-
Yang, Kim, Kim, 2003	-	-	-	-	500-8000	ASTM C 384-99	-

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

Tabela 4: Principais características dos tubos pesquisados na literatura, continuação

Fonte	Diâmetro interno (mm)	Material	Comprimento (m)	Marca/modelo	Faixa de frequências - intervalo	Método	Espessura das amostras (mm)
Choy e Huang, 2004	100x100-equiv d=112	acrílico	1,60	fab. Própria	100-1000 - 20Hz	TF Method; Two micr modificado	60, 185, 660
Ho et al., 2005	100	aço	0,90	B&K 4206	120-1400	-	1mm, 40mm
Mafra, Soeiro, Alves, 2005 (UFPA)	-	-	-	fab. Própria	220-1835	TF Method; Single Mic	25, 50, 75
Prodi, Pompoli e Bonfiglio, 2005	100	alumínio	1,45		100-1600 - 1/3 oitava	TF Method; Single Mic modificado	12 a 60
Salvo et al., 2005 (UFU)	34,2	pvc	0,48	fab. Própria	030-4500	TF Method; Single Mic	-
Sevillano Barja et al., 2005	34 calculado	-	-	Spectronics Inc.	100-5000	TF Method; Two micr	40
Alba et al., 2006	-	acrílico	-	fab. Própria	100-2000	TF Method; Two micr	1,8 a 39,7
Ham et al., 2007	34,9	bronze	-		050-4000	TF	-
Kino e Ueno, 2007	87,5	-	-	-	200-2000	-	17, 25
Boonen et al., 2008	40	aço	0,30;1,5	fab. Própria	000-1000	TF Method; Two micr	--
Dong-Li et al, 2008	100	-	1,20	-	125-1600	Single-freq ASTM 1050	10mm
Head, 2008	100	aço	0,98	B&K 4002	250-2000	SWR+TF	30mm
Massarani e Araujo, 2008 (INMETRO)	100	aço	0,98	B&K 4002 Immetro	050-2200	TF Method; Single Mic com carrinho	-
Navacerrada et al., 2008	29	aço	1,05	B&K 4206	200-6400	TF Method; Two micr	5, 10, 20, 40

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

Tabela 4: Principais características dos tubos pesquisados na literatura, continuação

Fonte	Diâmetro interno (mm)	Material	Comprimento (m)	Marca/modelo	Faixa de frequências - intervalo	Método	Espessura das amostras (mm)
Sanchis, 2008	40	acrílico	1,31	fab. Própria	100-6400	<i>TF Method; Two micr</i>	15, 20, 25, 30, 40
Silva, Godinho e Pereira, 2008	50	pvc com isolamento em concreto - 150x150	1,00	fab. Própria	125-4000	<i>TF Method; Single Mic</i>	5, 20, 25, 30
Silva, Godinho e Pereira, 2008	152	acrílico com isolamento em concreto - 220x220	1,70	fab. Própria	100-1250	<i>TF Method; Single Mic</i>	5, 20, 25, 30
Ersoy e Küçük, 2009	29	aço	1,05	B&K 4206	500-6300	<i>TF Method; Two micr</i>	10, 20, 30
Lu et al., 2009	100	-	-	-	050-5000	ISO 10534-2	5, 10, 20mm
Moreira, 2009 (UFMG)	100	aço	0,98	B&K 4002 Inmetro	100-1000	SWR-modificado	15
Sanchis, Alba; Del Rey, 2009	-	-	-	-	100-5000	<i>TF Method; Two micr</i>	15 a 60
Doutres et al., 2010	44,5	-	-	-	100-4200	<i>TF Method; Triple micr</i>	18,5 49,11 51,44 81
Melo et al., 2010	80	acrílico	0,80	-	000-3200	<i>Transfer Function - ISO10534-2</i>	-
Oliveira, 2010 (UFRN)	100	aço	0,98	B&K 4002 Inmetro	000-1000	SWR-modificado	20mm
Fouladi et al., 2011	100	-	-	-	100-5000	<i>Transfer Function - ISO10534-2</i>	20-50mm
Hu et al, 2011	66x66	aço	-	-	063-2000	<i>TF; two sources</i>	20, 25mm
Oldham et al., 2011	100	-	0,90	B&K 4206	050-1600	-	50
Oldham et al., 2011	29	-	1,05	B&K 4206	500-6400	-	50
Sakamoto et al., 2011	100	aço	0,90	B&K 4206	050-6400	<i>TF Method; Two micr- JIS A 1405-2</i>	25-100mm

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

### 2.3.3.3.3 Resíduos avaliados

#### A. Estudos Internacionais

Barja et al. (2003) apresentaram os resultados de absorção sonora de um compósito obtido a partir da reciclagem de uma planta chamada *Posidônia Oceânica*, adicionada à base de cimento. Foram analisadas duas densidades diferentes, além do estado de trituração do elemento vegetal em amostras de 40 mm de espessura. Estas possuíam quantidades diferentes de fibras em sua composição, em duas relações de cimento/água/fibra. O compósito de argamassa vegetal que apresentou a densidade mais alta (10/30/10) obteve resultados mais favoráveis com fibras de *Posidônia* mais largas, sem trituração. Enquanto que as amostras menos densas (5/15/5) obtiveram maior absorção acústica quando o estado de trituração das fibras vegetais foi maior, possuindo aparência mais esponjosa e, apresentando mais poros.

Alba et al. (2003) analisaram fibras têxteis demonstrando vantagens quando comparadas à lã de rocha, fibra de vidro e similares, pois são hipoalérgicos, de fácil instalação, laváveis e contra-fogo. As amostras foram preparadas com três camadas de espuma têxtil, sendo a manta de maior densidade ( $800\text{g/m}^2$ ) a que obteve o melhor resultado de absorção sonora ( $\alpha = 0,7$ ), seguida da manta de densidade intermediária ( $\alpha = 0,6$  em  $500\text{g/m}^2$ ) e, por último, da manta fina ( $\alpha = 0,45$  em  $250\text{g/m}^2$ ), na frequência de 1000 Hz. Em outro experimento com fibra têxtil associada a uma tela fina e amostras de painel perfurado de gesso contendo 5 mm de câmara de ar, destacaram-se em frequências de 700Hz, encontrando coeficiente de absorção com valores aproximados a 0,75.

Podri et al. (2005) compararam simultaneamente dois materiais absorvedores distintos colocados em extremidades opostas em um tubo de impedância. Os autores observaram que materiais fibrosos e porosos podem ser combinados e, desta maneira, otimizado o seu comportamento de absorção acústica. Fibras de poliéster de diferentes densidades, manta de melanina e composições de membranas com fibras de poliéster foram os materiais testados. Os resultados demonstraram que uma única amostra de membrana de fibra de poliéster com alta densidade apresentou coeficiente de absorção acústica máximo de 0,9 em frequência de 800 Hz, já o material com membrana de fibra de poliéster com densidade menor apresentou coeficiente de absorção próximo a 1 em frequências mais altas (1600 Hz). O estudo analisou diferentes materiais, destacando a combinação da melanina com espessura de 60mm, com membrana e fibra de poliéster de baixa densidade, que alcançou coeficiente de



absorção sonora equivalente a 1, em frequências superiores a 1000 Hz. Em seguida, apareceram em destaque às combinações dos materiais de fibra de poliéster com alta densidade e a membrana com fibra de poliéster, seguida de fibra de poliéster com baixa densidade e melanina com espessura de 30 mm.

Em outra pesquisa realizada por Alba et al. (2006), monocapas e multicapas foram analisadas, dando ênfase a lâminas betuminosas, lâminas de impacto reticuladas, lâminas com espumas, entre outras. Eles constataram que, nas baixas frequências (250 – 315 Hz), a manta cinza, a multicapa de espuma reticulada com lâmina mais espuma reticulada e a lã de rocha com maior densidade se destacaram, apresentando coeficiente entre 0,2 e 0,3. Já nas altas frequências (2000 Hz), a multicapa de espuma com lâmina, e a lã de rocha com maior densidade apresentaram coeficientes de absorção entre 0,85 e 0,95.

Navacerrada et al. (2008) apresentaram um estudo sobre coeficiente de absorção sonora em espumas de alumínio fabricadas mediante técnica pulvimetalúrgica, com distintas morfologias superficiais, usando materiais de recheio diferentes durante o processo de esfumação, comparando com espumas comerciais. O objetivo dos autores era usar essas espumas de alumínio como alternativa em painéis perfurados. Na análise, as espumas de alumínio foram cortadas em amostras com espessuras de 5 mm, 10 mm, 20 mm e 40 mm. Além disso, foram criados quatro tipos diferentes de espumas, com densidades e diâmetros de poros distintos. Nas espumas com pequenos diâmetros dos poros (1 a 2 mm) e altas densidades, a absorção aumentou quando a espessura se reduziu, ao contrario das espessuras com menor densidade e poros maiores (5 mm), nas quais a absorção aumentava quando a espessura aumentava. Porém, acima de 20 mm de espessura das amostras a absorção diminuiu, sendo a espessura ideal entre 8 e 12 mm. Segundo os autores, outra análise foi a combinação da espuma de alumínio com uma camada de lã mineral incluindo uma câmara de ar. A amostra que continha a câmara de ar entre a espuma e a lã demonstrou incremento no valor do coeficiente de absorção acústica.

Silva, Godinho e Pereira (2008) testaram diversos materiais, tais como aglomerado de cortiça negra, espuma de poliuretano, fibra de coco em rolo e em placa, utilizando tubo de impedância, além de câmara de reverberação de grandes e pequenas dimensões. Os experimentos apresentaram resultados semelhantes, o que comprovou a eficiência das três técnicas. Os resultados do tubo de impedância demonstraram que nas baixas frequências todos os materiais se comportaram de forma similar. Nas frequências médias, o aglomerado de cortiça negra se destacou como material mais absorvente, seguido da

fibra de coco em placa, em rolo e da espuma de poliuretano. Já nas altas frequências, o material que apresentou a absorção superior foi a fibra de coco em placa, seguido da fibra de coco em rolo, do poliuretano e por último, da cortiça negra.

Sanchis (2008), através da utilização do tubo de impedância, observou diversos materiais convencionais e outros fabricados a partir de resíduos têxteis com fibras naturais. A combinação destes últimos também foi analisada. Porém, foram poucos os materiais que puderam competir de forma satisfatória com a lã de rocha. Alguns materiais reciclados de fibras têxteis ou resíduo de espuma combinados com lâminas de impacto ou com poliéster alcançaram um bom desempenho de absorção acústica nas altas frequências, destacando-se o material oriundo de reciclagem com tripla camada de fibra têxtil ( $\alpha = 0,95$ ). Amostras com pequenas espessuras, variando de 40 mm a 50 mm, apresentaram uma boa absorção acústica em baixas frequências.

Nos estudos realizados por Ersoy e KuçüK (2009), foi desenvolvido um material com três diferentes camadas de fibras de resíduos de folhas de chá, acrescido de uma camada de tecido têxtil. Os dados indicaram que os resíduos de folhas de chá com revestimento protetor, na espessura de 10 mm, proporcionaram absorção sonora equivalente a seis camadas de material têxtil. Amostras com espessura de 20 mm, comparadas a fibras de polipropileno não tecido, demonstraram absorção sonora semelhante nas frequências entre 500 e 3200 Hz. Com espessura de 10 mm, a manta com resíduo de chá apresentou 75% de absorção sonora maior que a fibra de polipropileno, nas frequências mais altas (4000 a 6300 Hz). Os autores relataram ainda a importância do apoio dado pela camada de tecido nas amostras de 10 mm, pois estas aumentaram consideravelmente a absorção acústica, variando de 0,25 para 0,80. Nas espessuras maiores, ocorreu um incremento de 100% de absorção acústica, devido ao uso do tecido.

Sanchis et al. (2009) estudaram tecidos de poliéster obtidos a partir da reciclagem de garrafas PET. Três amostras diferentes foram comparadas entre si, sendo nominadas como Sonopiel M, as amostras à base de PET reciclado; Sonopiel LI, uma amostra de lã de poliéster ignífuga existente no mercado; e Sonopiel RC, uma versão sem tratamento ignífugo da lã de poliéster. Todas possuíam 40 mm de espessura e aproximadamente  $10 \text{ Kg/m}^3$  de densidade. O coeficiente de redução de ruído (NRC) encontrado foi de 0,42 para o novo material em comparação a 0,50 do material utilizado normalmente. Portanto, o custo menor justifica o uso de fibra reciclada à base de PET reciclado.

Doutres et al. (2010) compararam técnicas e métodos diferentes para determinar as propriedades acústicas e não acústicas de materiais fibrosos e porosos. Foram comparados quatro materiais, utilizando um tubo de impedância. Estes resultados foram confrontados com métodos existentes diretos (análise da porosidade) e indiretos (avaliação macroscópica). Os resultados encontrados foram semelhantes, quando comparados os três métodos entre si. O material A, que era uma espuma com baixa resistividade estática ao fluxo de ar, de esqueleto duro e densidade baixa, mostrou maior coeficiente de absorção e maior perda por transmissão, se comparado aos materiais C e D, os quais eram compostos por fibras de alta densidade, esqueletos macios e baixa resistência ao fluxo de ar.

Oldham e Egan (2011) propuseram soluções alternativas baseadas na utilização de biomassa de linho, cânhamo, soja, sisal, lã, algodão para a confecção de painéis ou membranas absorvedoras de som. Observaram que as amostras com espessura de 50 mm demonstraram que a fibra de algodão e as fibras de soja possuíam propriedades de absorção acústicas semelhantes às da lã de rocha ou fibra de vidro, da mesma espessura, porém as amostras de fibras de lã e de sisal se mostraram menos eficazes, provavelmente, pela natureza de suas fibras, segundo esses autores.

#### B. Estudos no Brasil

No trabalho apresentado por Mafra (2005) foram estudadas características acústicas de painéis de fibra de coco comparados com painéis acústicos de espuma de uso comercial. Concluíram que o painel de fibra de coco obteve desempenho superior ao comercial, sendo a densidade e espessura do mesmo diretamente proporcional ao aumento do coeficiente de absorção sonora. O painel de fibra de coco com  $130 \text{ Kg/m}^3$  de densidade e 75mm de espessura foi o que apresentou melhor desempenho.

Moreira (2009) desenvolveu dois materiais com propriedades acústicas absorvedoras e com dimensões semelhantes às encontradas no mercado. Fibras metálicas e poliméricas foram adicionadas, criando compósitos com a expectativa de desenvolver painéis perfurados absorvedores. Para deixar o painel mais tenaz, foram incluídas fibras de aço treliçadas, correspondendo a 7,9 % da massa da amostra. Nas amostras com fibras poliméricas, 4,6% de massa foram de fibras poliméricas, com o objetivo de aumentar a resistência mecânica. Ambas foram comparadas a painéis de MDF, de 15 mm de espessura. Analisando os resultados, existiu similaridade nos dados encontrados do coeficiente de absorção do concreto quando se utilizaram as fibras metálicas ( $\alpha = 0,83$  a 500 Hz) e fibras poliméricas ( $\alpha = 0,91$  a 500 Hz). A colocação de manta e de uma camada de ar melhorou

consideravelmente a absorção acústica do sistema. Quando se acrescentou manta fono-absorvedora de poliéster reciclado (oriundo de garrafas PET), os materiais demonstraram bons resultados, com elevados coeficientes de absorção, podendo substituir as mantas de lã de vidro, segundo a autora.

Oliveira (2010) desenvolveu um material composto por matriz poliuretânica vegetal derivada do uso de óleo de semente de mamona, reforçado com resíduos de fibras de pneus. Foram produzidos corpos-de-prova com diferentes percentagens de resíduos (5%, 10%, 15% e 20% em massa), para determinar o índice de absorção sonora e a densidade aparente. Os compósitos com 15% de resíduos de pneus apresentaram melhores resultados diante de outras composições ( $\alpha = 0,16$  a 1000 Hz). Além disso, os resultados dos compósitos estudados demonstraram capacidade de absorção sonora 15% maior que o poliuretano de mamona sem adição de resíduo de pneu ( $\alpha = 0,05$ ), ficando abaixo apenas 7% do Poliuretano de petróleo ( $\alpha = 0,23$ ) na frequência de 1000 Hz.

A sintetiza os estudos realizados pelos autores com os diferentes materiais, medidos no tubo de impedância, verificando a absorção acústica dos mesmos. E a apresenta os valores de densidade, espessura, tipo de material e coeficiente de redução de ruído para materiais convencionais à venda no mercado.

Assim, pode-se observar que, em alguns casos estudados, a menor densidade está vinculada ao maior coeficiente de redução de ruído (NRC), porém em outros casos, não. A literatura indica que tudo depende da estrutura molecular formadora dos compósitos. A maioria dos materiais analisados possui estrutura fibrosa e seus NRCs são geralmente superiores aos NRCs dos materiais porosos. A média dos NRCs encontrados não ultrapassa 0,24, ficando abaixo dos materiais convencionais, que correspondem a NRC de 0,78. Quando utilizados compósitos de argamassa, destaque para a adição de fibras metálicas e fibras *Posidônias* trituradas de menor densidade, alcançando 0,5 de coeficiente ponderado.

Tabela 5: Síntese dos estudos realizados pelos autores estudados

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Tipo de Material	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	NRC
<b>Alba et al., Espanha (2003)</b>								
Cartão de Gesso	13	10	Monocapa	0,21	0,26	0,29	0,30	0,27
Cartão de Gesso+ar+ Cartão de Gesso	63	20	Multicapa	0,25	0,26	0,42	0,37	0,33
Cartão de Gesso+Tela Final+ Cartão de Gesso	63	20	Multicapa	0,30	0,38	0,44	0,43	0,39
Fibra Textil A	0,80 Kg/m <sup>2</sup>	50	Fibroso	0,12	0,18	0,30	0,50	0,28
Fibra Textil B	0,45 Kg/m <sup>2</sup>	50	Fibroso	0,11	0,15	0,25	0,38	0,22
Fibra Textil C	0,25 Kg/m <sup>2</sup>	50	Fibroso	0,08	0,13	0,20	0,35	0,19
<b>Choy e Huang, Hong Kong (2004)</b>								
Fibra de Vidro A	60	40	Fibroso	0,30	0,75	0,96	-	0,67
Fibra de Vidro B	85	40	Fibroso	0,95	0,87	0,95	-	0,92
Fibra de Vidro C	660	40	Fibroso	0,92	0,98	1,00	-	0,97
<b>Prodi, Pompili e Bonfiglio, Itália (2005)</b>								
Fibra de Poliéster 1	67,5	12	Fibroso	0,05	0,10	0,18	-	0,11
Fibra de Poliéster 2	38,5	60	Fibroso	0,25	0,50	0,85	-	0,53
Edifibra	40,7	30	Fibroso	0,10	0,20	0,40	-	0,23
Melanina	10,0	30	Monocapa	0,10	0,20	0,50	-	0,27
Sanduiche de Membrana de Alumínio+Poliéster 1	37,4	50	Multicapa	0,20	0,70	0,80	-	0,57
Sanduiche de Membrana de Alumínio+Poliéster 2	60,0	55	Multicapa	0,10	0,23	0,65	-	0,33
<b>Barja et al., Espanha (2005)</b>								
Composito de Argamassa com fibra de <i>Posidônia</i> sem Trituração menos denso(5/15/5)	290	40	Fibroso	0,35	0,55	0,40	0,50	0,45
Composito de Argamassa com fibra de <i>Posidônia</i> Triturada (5/15/5)	300	40	Fibroso	0,30	0,35	0,90	0,65	0,55

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

Tabela 5: Síntese dos estudos realizados pelos autores estudados, continuação

Materiais	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Tipo de Material	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	NRC
Composto de Argamassa com fibra de <i>Posidônia</i> Muito Triturada mais denso(10/30/10)	630	40	Fibroso	0,13	0,10	0,10	0,13	0,12
Composto de Argamassa com fibra de <i>Posidônia</i> Triturada (10/30/10)	570	40	Fibroso	0,13	0,10	0,10	0,15	0,12
Composto Arg. fibra de <i>Posidônia</i> sem Trituração (10/30/10)	560	40	Fibroso	0,13	0,10	0,15	0,20	0,15
<b>Alba et al., Espanha (2006)</b>								
Lâmina de Impacto	28,90	11,0	Monocapa	0,18	0,08	0,05	0,15	0,12
Lâmina Betuminosa	1522,4	4,60	Monocapa	0,03	0,25	0,05	0,05	0,10
Sanduíche de Espuma Reticulada+Lâmina+Espuma	236,90	34,6	Multicapa	0,30	0,26	0,25	0,40	0,30
Sanduíche de Espuma +lâmina	267,40	25,0	Multicapa	0,08	0,10	0,35	0,65	0,30
Lã de Rocha	69,30	35,6	Fibroso	0,10	0,31	0,70	0,95	0,52
Espuma Reticulada	172,60	18,9	Poroso	0,05	0,18	0,50	0,89	0,41
Lâmina de vidro+ Lâmina Asfáltica + Lã de Vidro	392,90	16,0	Multicapa	0,05	0,15	0,42	0,65	0,32
<b>Navacerrada et al., Espanha (2008)</b>								
Espuma de Alumínio 1	990-1060	20	Poroso	0,15	0,20	0,28	0,27	0,23
Espuma de Alumínio 2	800-1000	5,0	Poroso	0,05	0,05	0,13	0,30	0,13
Espuma de Alumínio 3	560-600	40	Poroso	0,20	0,25	0,45	0,98	0,47
Espuma de Alumínio 4	620-690	10	Poroso	0,05	0,10	0,28	0,86	0,32
ALPORA	330-340	20	Poroso	0,05	0,15	0,28	0,90	0,35
<b>Silva, Godinho e Pereira, Portugal (2008)</b>								
Aglomerado de Cortiça Negra	120	30	Manta	0,10	0,23	0,50	0,30	0,28
Espuma de Poliuretano	23	5,0	Poroso	0,05	0,08	0,10	0,55	0,20
Fibra de Coco em Placa	110-115	25	Fibroso	0,08	0,10	0,25	0,70	0,28
Fibra de Coco em Rolo	80-88	20	Fibroso	0,10	0,20	0,17	0,35	0,21

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

Tabela 5: Síntese dos estudos realizados pelos autores estudados, continuação

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Tipo de Material	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	NRC
<b>Sanchis, Espanha (2008)</b>								
Lã de Rocha	63	40	Fibroso	0,15	0,50	0,85	0,95	0,61
Lã de Rocha	170	15	Fibroso	0,07	0,15	0,40	0,80	0,36
Sanduiche reciclado tricapa fibra têxtil	295	30	Multicapa	0,25	0,32	0,52	0,75	0,46
Fibra de Poliéster IG700	70	40	Fibroso	0,12	0,17	0,28	0,50	0,27
Fibra de Poliéster RC 700	70	40	Fibroso	0,12	0,17	0,28	0,48	0,26
Sanduiche reciclado tricapa lamina viscoelástica	273	25	Multicapa	0,25	0,16	0,15	0,15	0,18
Sanduiche reciclado tricapa lamina viscoelástica + porexpan	227	20	Multicapa	0,07	0,15	0,32	0,75	0,32
Sanduiche reciclado tricapa lamina viscoelástica + lã de rocha	359	15	Multicapa	0,15	0,35	0,48	0,38	0,34
Fibra de Poliéster IG 400	40	30	Fibroso	0,12	0,16	0,26	0,43	0,24
Fibra de Poliéster RC 400	40	30	Fibroso	0,10	0,13	0,22	0,45	0,23
<b>Ersoy e Küçük, Turquia (2009)</b>								
Fibra de Poli-propileno Não tecido A	-	10	Fibroso	-	0,08	0,10	0,18	0,12
Fibra de Poli-propileno Não tecido B	-	20	Fibroso	-	0,14	0,27	0,57	0,33
Fibra de Poli-propileno Não tecido C	-	30	Fibroso	-	0,22	0,57	0,88	0,56
Fibras de Folhas de Chá A	25,35	10	Fibroso	-	0,06	0,07	0,12	0,08
Fibras de Folhas de Chá B	25,35	20	Fibroso	-	0,10	0,13	0,23	0,15
Fibras de Folhas de Chá C	27,50	30	Fibroso	-	0,12	0,19	0,40	0,24
Sanduiche de 6 camadas de Tecido de Algodão	-	10	Multicapa	-	0,05	0,07	0,15	0,09
Fibras de Folhas de Chá + 1 camada de tecido A	-	10	Multicapa	-	0,08	0,14	0,28	0,17
Fibras de Folhas de Chá + 1 camada de tecido B	-	20	Multicapa	-	0,16	0,27	0,70	0,38
Fibras de Folhas de Chá + 1 camada de tecido C	-	30	Multicapa	-	0,18	0,40	0,89	0,49

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.

Tabela 5: Síntese dos estudos realizados pelos autores estudados, continuação

Materiais	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Tipo de Material	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	NRC
<b>Sanchis, Alba; Del Rey, Espanha (2009)</b>								
Lonas de Poliéster de PET Reciclado	-	40	Fibroso	0,25	0,30	0,42	0,53	0,38
Lã de Poliéster ignífuga/Mercado	-	40	Fibroso	0,22	0,37	0,50	0,62	0,43
Lã de Poliéster Sem Tratamento ignífugo	-	40	Fibroso	0,20	0,31	0,44	0,54	0,37
<b>Doutres et al., Canadá (2010)</b>								
Espuma A	51,44	9,0	Poroso	0,25	0,50	0,80	0,98	0,63
Fibra C	18,5	5,5	Fibroso	0,05	0,10	0,25	0,6	0,25
<b>Moreira, Brasil/UFMG (2009)</b>								
Composto de Concreto/Fibras Metálicas	-	15	Fibroso	0,40	0,47	0,64	-	0,50
Composto de Concreto/Fibras Poliméricas	-	15	Fibroso	0,47	0,40	0,57	-	0,48
Painel Perfurado de madeira	-	15	Fibroso	0,42	0,43	0,45	-	0,43
<b>Oliveira, Brasil/UFRN (2010)</b>								
Poliuretano de mamona	39,85	20	Poroso	0,04	0,04	0,05	-	0,04
Poliuretano de mamona+Resíduo de Pneu 15%	54,13	20	Fibroso	0,04	0,07	0,16	-	0,09
Poliuretano de Petróleo	49,63	20	Poroso	0,14	0,14	0,23	-	0,17
<b>Oldham et al., Inglaterra/Espanha (2011)</b>								
Fibra de Soja	1290	50	Fibroso	0,15	0,38	0,85	0,98	0,59
Fibra de Algodão	1530	50	Fibroso	0,25	0,65	0,95	0,95	0,70
Fibras de Lã	1300	50	Fibroso	0,12	0,22	0,42	0,63	0,35
Fibras de Sisal	1410	50	Fibroso	0,05	0,08	0,2	0,38	0,18

Obs.: (-) Dado não indicado no texto.



Tabela 6: Características dos materiais acústicos convencionais.

Materiais	Densidade (kg/m³)	Espessura (mm)	Tipo de Material	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	NRC
<b>Bistafa (2006) Isover - Santa Maria: Placa de Lã de Vidro</b>								
Lã de Vidro	30	25	Fibroso	0,27	0,50	0,87	0,98	0,66
Lã de Vidro	30	50	Fibroso	0,62	0,90	1,08	1,07	0,92
Lã de Vidro	60	25	Fibroso	0,27	0,68	0,94	1,03	0,73
Lã de Vidro	60	50	Fibroso	0,75	0,96	1,03	0,88	0,91
<b>Bistafa (2006) Thermax- RockFibras: Manta de Lã de Rocha basáltica</b>								
Lã de Rocha	32	50	Fibroso	0,48	0,74	0,88	0,91	0,75
Lã de Rocha	32	100	Fibroso	0,98	1,10	1,11	1,09	1,07
Lã de Rocha	64	50	Fibroso	0,59	0,91	1,05	1,06	0,90
Lã de Rocha	64	100	Fibroso	1,23	1,19	1,15	1,12	1,17
Lã de Rocha	80	50	Fibroso	0,68	1,00	1,04	1,00	0,93
Lã de Rocha	80	100	Fibroso	1,23	1,19	1,16	1,09	1,17
<b>Bistafa (2006) Espuma Flexível de Poliuretano Poliéster</b>								
Espumex_ Acústica São Luiz	-	40	Poroso	0,19	0,38	0,52	0,48	0,39
Espumex_ Acústica São Luiz	-	60	Poroso	0,28	0,49	0,53	0,47	0,44
Espumex_ Acústica São Luiz	-	70	Poroso	0,42	0,75	0,74	0,66	0,64
Espumex_ Acústica São Luiz	-	75	Poroso	0,50	0,90	0,99	1,00	0,85
Sonex - Illbruck	32	20	Poroso	0,12	0,28	0,44	0,60	0,36
Sonex - Illbruck	32	35	Poroso	0,20	0,45	0,71	0,95	0,58
Sonex - Illbruck	32	50	Poroso	0,32	0,72	0,88	0,97	0,72
Sonex - Illbruck	32	75	Poroso	0,53	0,90	1,07	1,07	0,89
Reboco desempenado sobre qualquer alvenaria								
Reboco sobre qualquer alvenaria								
Obs.: (-) Dado não indicado no texto.				0,03	0,04	0,05	0,04	0,04

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa combinou esforços teóricos e práticos. Na Figura 39 apresenta-se o fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa. A revisão da literatura forneceu a base conceitual. O método de pesquisa adotado foi o experimental, com análise das propriedades acústicas. A propriedade que foi mensurada foi o coeficiente de reflexão, utilizando um tubo de impedância, sendo calculado o coeficiente de absorção das amostras estudadas. Foram investigados compósitos de argamassa com substituição parcial da areia por diferentes resíduos e em diferentes teores de substituição. O comportamento destes compósitos foi investigado e comparado com o de materiais isolantes convencionais.

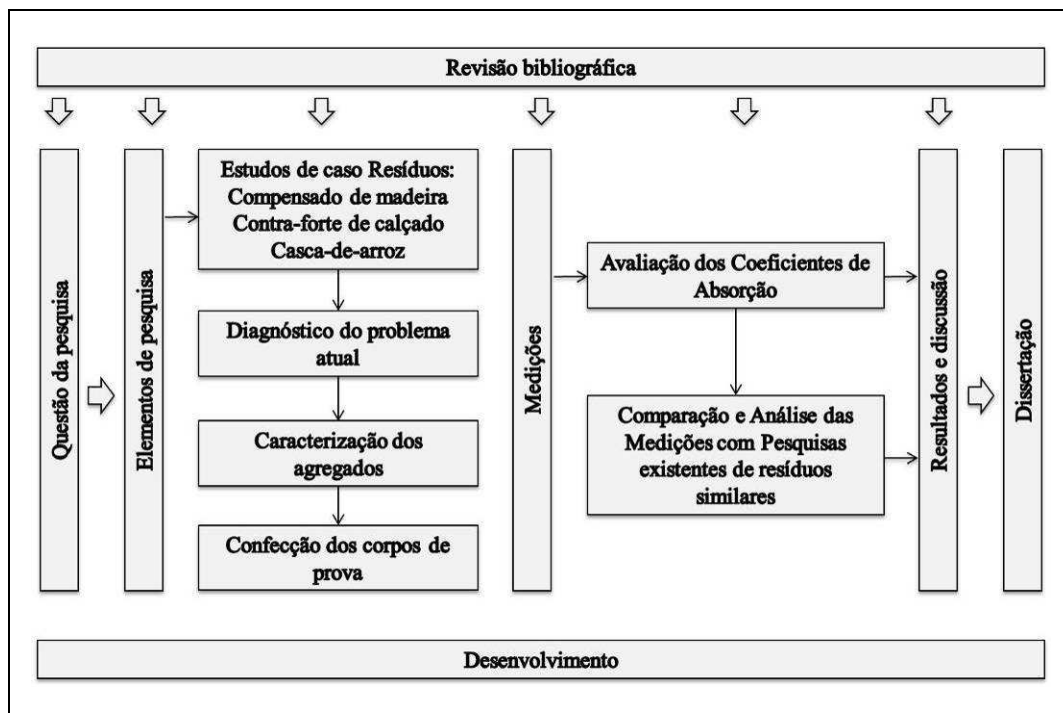


Figura 39: Fluxograma da metodologia de pesquisa

Os resíduos selecionados foram: compensado resinado, casca de arroz e contraforte termoplástico impregnado (não tecido) de calçados. O critério de seleção levou em conta a disponibilidade destes resíduos na região e a experiência em pesquisas anteriores dentro do PPGE/UNISINOS, aproveitando os esforços de caracterização e análise do comportamento quanto a outros aspectos.

Os materiais convencionais utilizados para comparação foram lã de vidro e espuma acústica, dados oriundos de pesquisa de Bistafa (2006).

Tendo em vista o relativo desconhecimento do comportamento acústico dos resíduos investigados, o programa experimental explorou o potencial dos compostos. Foi utilizada a técnica de tubo de impedância para análise das composições (em diferentes dosagens de substituição e mantendo a espessura), devido à fácil confecção e possibilidade de estudar CPs de pequena dimensão com grande variedade de compósitos.

Inicialmente os materiais empregados foram caracterizados, sendo que o cimento, a areia e os resíduos foram caracterizados através dos ensaios apresentados no Quadro 8. As demais etapas da pesquisa são detalhadas a seguir.

**Quadro 8: Caracterização dos materiais para o desenvolvimento dos experimentos.**

Ensaio	Normas
Análise granulométrica	ANBT NBR NM 248:2002
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária	ABNT NBR NM 7251:1982
Material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003

### 3.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para os três primeiros materiais, a produção dos CPs foi realizada através de uma metodologia de experimentos, com o esquema básico apresentado no Quadro 9. Os CPs foram produzidos com argamassa de cimento e areia, com substituição de parte da areia pelo material em teste, considerando os teores de substituição em volume, devido à densidade diferente dos materiais.

**Quadro 9: Modelo experimental – combinações de espessura das amostras e teor de substituição da areia pelo material em teste**

Espessura	Teor de substituição da areia (em volume) *				
	0%	5%	10%	25%	50%
20 mm	X	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B, C

\* X: Argamassa sem substituição (referência); A: Compensado resinado; B: Casca de arroz; C: Contraforte.

Para cada uma destas combinações foram moldados dois corpos de prova, totalizando vinte e quatro CPs com substituições e dois CPs sem substituições. As medições foram realizadas em apenas um CP para cada composição, sendo o segundo reservado para contraprova.

## 3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 Aglomerante

Nesta pesquisa foi utilizado como aglomerante o cimento Portland CP IV, classe 32, escolhido por ser facilmente encontrado no varejo no estado do Rio Grande do Sul e ser de vasta utilização em argamassas (RECENA, 2007). Para evitar variações não controladas, o cimento usado em todo o experimento foi adquirido de um único lote. No Quadro 10, estão representados os resultados dos ensaios de caracterização química, física e requisitos especificados pela norma NBR 5736 (1991), para o cimento CP IV-32, conforme o fabricante.

**Quadro 10: Caracterização física e química do cimento CP IV-32**

Ensaio		Métodos de ensaio	Resultados	Requisitos exigidos pela NBR 5736
Massa específica* (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23	2,94	-
Finura	Peneira # 200 (%)	NBR 11579	0,92	< 8,0 %
	Peneira # 325 (%)	NBR 9202	4,94	-
Tempo de Pega	Início (h:min)	NBR NM 65	02:50	> 1h
	Fim (h:min)		03:20	< 12h
Água Consistência (%)		NBR NM 43	30	-
Blaine (m <sup>2</sup> /kg)		NBR NM 76	438,1	> 300m <sup>2</sup> /kg
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	NBR 7215	20,76	> 10,0 MPa
	7 dias		25,82	> 20,0 MPa
	28 dias		37,92	> 32,0 MPa
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	NBR 14656	3,78	< 4,5
	Resíduo insolúvel		25,62	16 a 50
	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		2,83	< 4,0
	Óxido de magnésio (MgO)		4,99	< 6,3

Fonte: Fabricante Votoram (2011)

### 3.2.2 Agregados e resíduos

#### 3.2.2.1 Origem

Foi utilizada uma areia de origem quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, na Região Metropolitana de Porto Alegre. Para substituição parcial da areia, foram utilizados três resíduos: o compensado resinado, originário de resíduos da construção civil, cedido pela Construtora Axial Engenharia Ltda., de Novo Hamburgo/RS; o contraforte de calçado, fornecido pela Empresa Calçados Jacobi Ltda., também da cidade de Novo Hamburgo/RS e a casca de arroz, oriunda da Arrozella - Arrozeira Turella LTDA, com sede em Nova Santa Rita, RS e plantio localizado no oeste gaúcho.

A empresa Arrozella informou que as cascas de arroz são geradas através de um processo de beneficiamento, onde o arroz é primeiramente separado das impurezas mais grossas. Em seguida segue para os descascadores que separam o arroz da casca por atrito, através de dois roletes de borracha que funcionam em direções opostas. As cascas de arroz são, então, recolhidas no silo de casca, onde são armazenadas para posterior descarte. O arroz segue para os separadores que separam o arroz descascado (esbramato) do não descascado (marinheiro) que retorna ao Silo Pulmão e recomeça o ciclo de descascamento.

### 3.2.2.2 Preparação dos resíduos

Os resíduos de compensado de madeira e de contraforte de calçado, foram previamente limpos e depois moídos em um moinho de facas, marca Mecanofar, Modelo MF230 (Figura 41a). As partículas foram trituradas e adquiriram diâmetros inferiores a 6,3mm.

O resíduo de compensado de madeira (Figura 40a) necessitou reduzir-se em fragmentos menores, antes da trituração no equipamento (Figura 41a), com dimensões compatíveis com a capacidade do moinho de facas, sendo seccionadas em pedaços de tamanho de 5 cm x 15 cm, através de serra circular (Figura 40b).

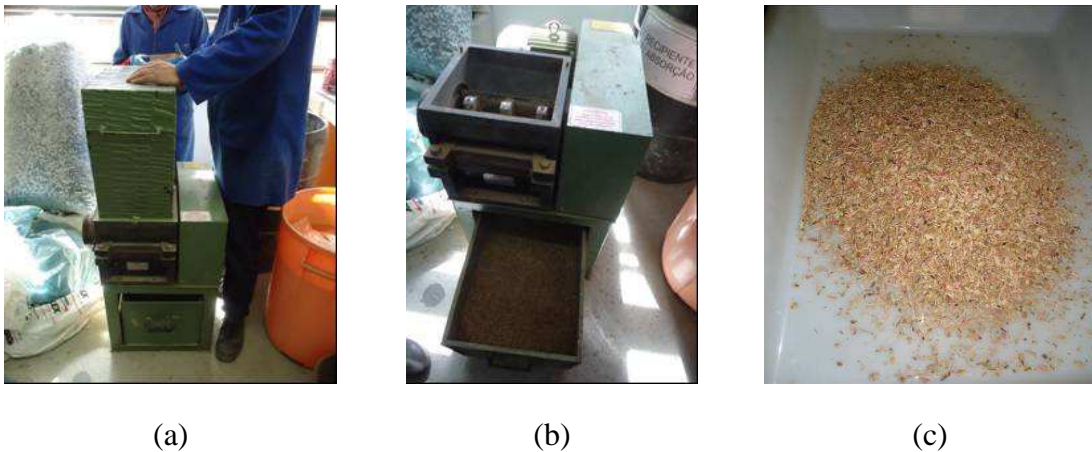


(a)



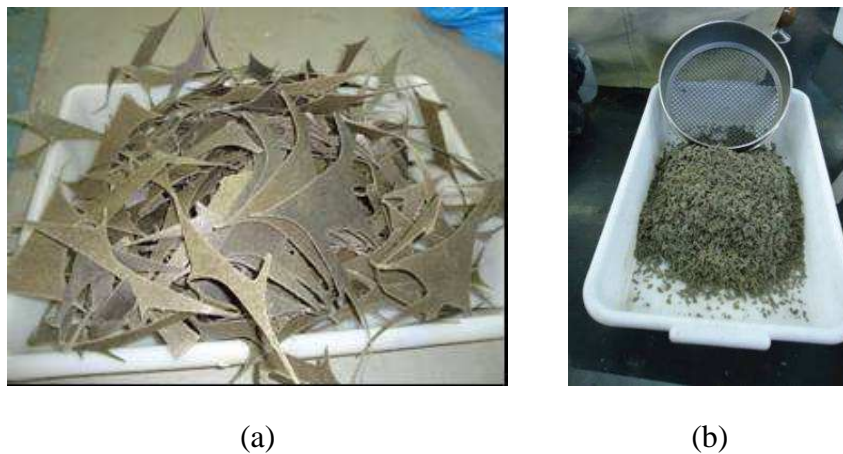
(b)

**Figura 40: Resíduo das placas de compensado de madeira: (a) gerado na construção civil; (b) Vista em detalhe das peças de compensados de madeira já cortadas, prontas para trituração no equipamento**



**Figura 41: (a) Moinho de facas, (b) Resíduo de compensado de madeira gerado na operação de trituração das peças, (c) Resíduo de compensado de madeira triturado**

O resíduo de contraforte, para ser moído no triturador de facas, não necessitou diminuir de tamanho, portanto o resíduo industrial foi triturado sem haver outros processos intermediários (Figura 42).



**Figura 42: Resíduo de contraforte termoplástico impregnado : (a) gerado na indústria calçadista; (b) gerado na operação de trituração do resíduo**

A preparação do resíduo de casca de arroz constou em verificar e segregar as partículas estranhas, através da seleção prévia, retirando as impurezas através de peneiramento e eventualmente algumas foram retiradas manualmente, como restos de pedriscos, palhas, entre outros (Figura 43a e b).



**Figura 43: Casca de arroz: (a) resíduo de casca de arroz natural; (b) casca de arroz, onde não foi necessário a operação de trituração**

Após secagem em estufa a 100 °C durante 24 horas para a areia, e a 60 °C durante 8 horas, para os três resíduos (porque havia umidade), os materiais ficaram armazenados em tonéis de plástico, devidamente tampados e identificados.

### 3.2.2.3 Caracterização dos agregados

#### 3.2.2.3.1 Massa específica e unitária

A caracterização dos agregados levou em consideração a massa unitária em estado solto da areia e dos resíduos. Contudo, somente para areia foram caracterizadas a massa específica e a determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Na Tabela 7, estão detalhados os resultados encontrados na realização dos ensaios e as normas técnicas que foram utilizadas.

**Tabela 7: Caracterização dos agregados**

Ensaio	Método de ensaio	Resultados*			
		Areia	Compensado Resinado	Casca de Arroz	Contraforte
Massa unitária no estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 7251	1569,02	183,78	96,88	181,77
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52	2,53	-	-	-
Determinação material fino através peneira 75µm, por lavagem (%)	NBR NM 46	1,20	-	-	-

\* Os resíduos, devido à baixa densidade de massa, impediram os ensaios de massa específica e determinação do material fino passante na peneira 75µm.

Pode-se observar, através da análise dos resultados contidos na Tabela 7, que a massa unitária no estado solto da areia é muito superior quando comparada aos resíduos testados. Sua massa chega a ser oito vezes maior que a do compensado de madeira. Por sua vez, quando se analisam os resíduos, percebeu-se que o compensado resinado de madeira e o



contraforte de calçado possuem massa unitária semelhante, sendo a casca de arroz o resíduo com menor massa unitária, representando apenas 6% da massa unitária da areia. Além das propriedades dos materiais, a massa unitária menor dos resíduos, pode ter sido influenciada pela forma do grão, que visivelmente apresenta um caráter um pouco irregular e menos arredondado de suas partículas quando comparados aos grãos de areia. Além disso, acredita-se que as características física, química e de microestrutura própria e distinta de cada resíduo também tenha interferido na massa unitária. A forma um pouco mais lamelar da casca de arroz, observada visualmente e qualitativamente, pode ter influenciado na análise do resultado de menor massa unitária, quando comparada aos outros resíduos (Figura 44a , b, c e d).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 44: Análise visual da forma dos grãos da areia e das partículas dos resíduos: (a) areia natural; (b) compósito de compensado resinado de madeira; (c) casca de arroz; (d) contraforte de calçado**

Ao analisar a massa específica da areia natural, constatou-se que os resultados encontraram-se próximos aos valores relatados por Arnold (2011), sendo esta conformação a da areia encontrada no Rio Jacuí.



Já o ensaio da determinação do material fino que passa através da peneira 75 $\mu$ m, por lavagem, apresentou-se um pouco inferior, atingindo valores de 1,2% em comparação a 1,5% obtido por Arnold (2011). No caso, há pouca diferença entre os dois resultados.

#### 3.2.2.3.2 Análise da granulometria

Uma pré-seleção do material, através de quarteamento, foi efetuada antes de se iniciar a análise granulométrica. Para essa análise, foi realizada a distribuição granulométrica dos agregados, utilizando peneiras de série normal e intermediária. As frações retidas em cada peneira foram separadas, desde a abertura 6,3mm até o fundo, para avaliar as frações dimensionais do agregado, porcentagem de partículas retidas nas peneiras e módulo de finura.

As peneiras utilizadas possuíam malha quadrada, especificadas na NBR 5734 (1988), com razão dois entre abertura de malha. O método foi determinado pela NBR 248 (2003). O equipamento utilizado para a distribuição granulométrica foi um agitador de peneiras, da marca Bertel, diâmetro de 200 mm pelo tempo aproximado dez minutos, em velocidade média.

Para realização dos ensaios, foram utilizadas massas diferentes para os diversos materiais, pois cada um possui um volume distinto. Para a areia, foi ensaiado um quilograma de material, dividindo-se em duas amostras. Para os resíduos de compensado de madeira e contraforte de calçado, foram quinhentos gramas cada, dando origem a duas amostras. Devido ao grande volume da casca de arroz, foram separados duzentos gramas de resíduo, também divididos em duas amostras. Na Figura 45 e Figura 46 (Apêndice A), estão representados a análise granulométrica do agregado natural e dos resíduos estudados.

Pode-se observar, na Figura 45, que existem diferenças na distribuição granulométrica dos materiais analisados. Apenas os resíduos de casca de arroz e compensado de madeira apresentaram semelhança entre si na distribuição, verificando-se maior quantidade de partículas na peneira de 1,2 mm (54% e 51%). A areia média apresentou uma distribuição mais uniforme, com medidas de 10% de grãos retidos na peneira 1,2 mm, 30% na peneira 0,3mm e 20% na peneira 1,8 mm, em contraponto ao resíduo de contraforte de calçado que obteve maior concentração de partículas nas peneiras 2,4 mm (52%) e 4,8 mm (38%). As amostras de resíduo de casca de arroz, compensado de madeira e areia média apresentaram menos de 1% de partículas nas peneiras 4,8mm e 6,3mm. A curva granulométrica evidencia a similaridade das curvas das partículas de compensado resinado e casca de arroz e o afastamento das curvas da areia e do resíduo de contraforte (Figura 46).

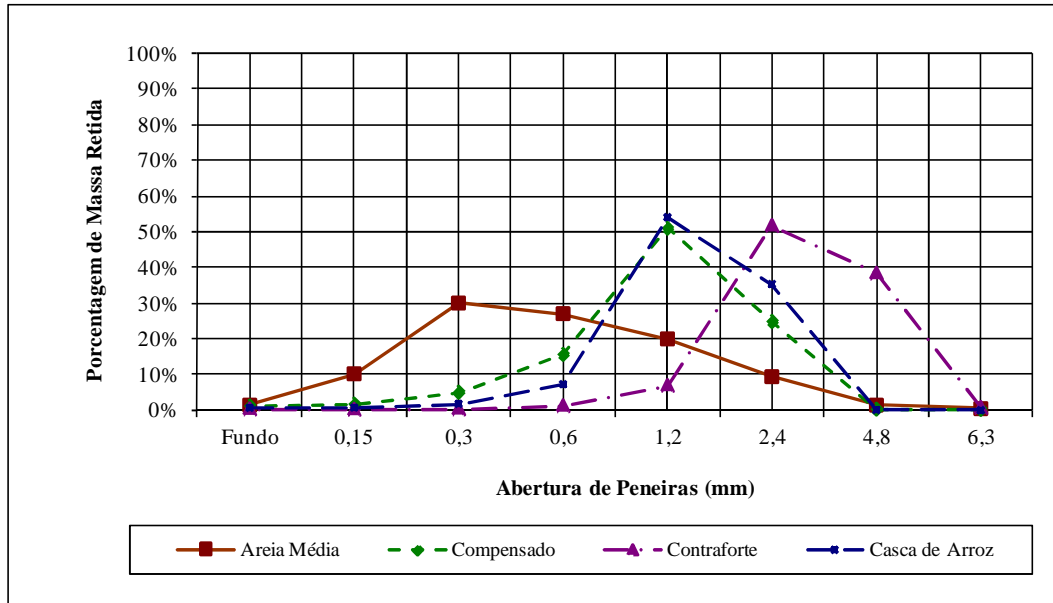


Figura 45: Distribuição granulométrica da areia e dos resíduos, fração retida

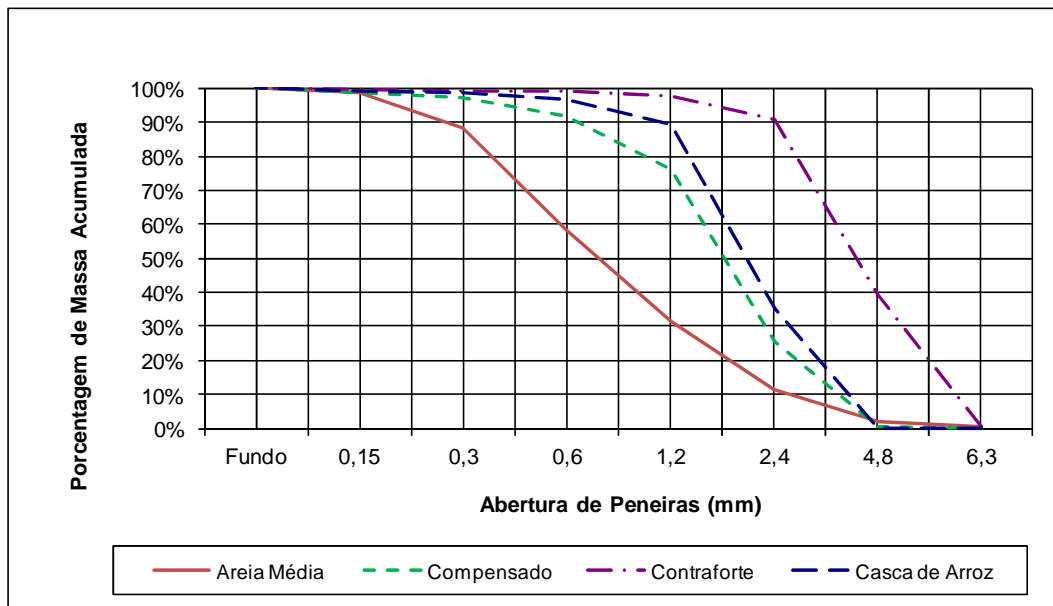


Figura 46: Curva granulométrica da areia e dos resíduos, massa acumulada

A dimensão máxima e o módulo de finura da areia e dos resíduos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dimensão máxima e módulo de finura dos materiais

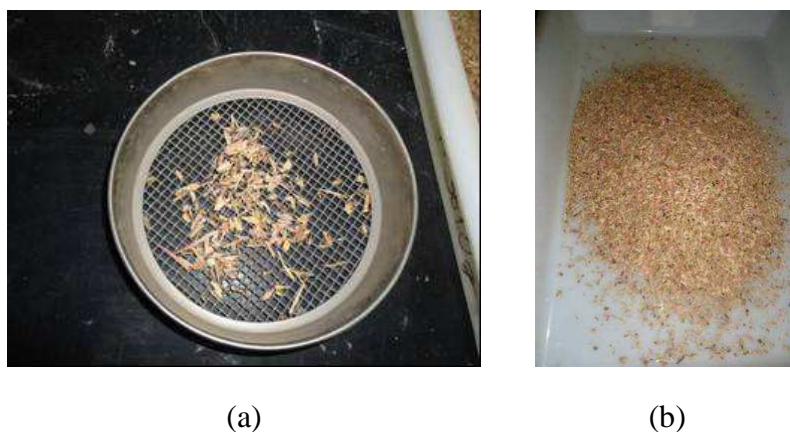
Agregados	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de Finura
Areia	4,8	2,9
Compensado resinado	4,8	3,9
Casca de Arroz	4,8	4,2
Contraforte	6,3	5,3

A dimensão máxima do contraforte de calçado (6,3mm) mostrou-se superior à dimensão máxima encontrada na areia, compensado resinado e casca de arroz, que foram iguais a 4,8mm.

### 3.3 PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Para realização da argamassa na pesquisa, uma seleção das partículas foi realizada, através de peneiramento prévio, utilizando a peneira de 4,8mm de diâmetro de abertura. Isso possibilitou a segregação dos materiais, garantindo que partículas superiores a esta dimensão fossem descartadas, gerando, assim, amostras de agregados miúdos que podem proporcionar misturas com maior trabalhabilidade e maior homogeneidade. Partículas passantes pela peneira com abertura de 4,8mm são consideradas uma fração de agregados miúdos, segundo a norma NBR 7211(2009) e recomendadas para a utilização em argamassas.

Por exemplo, o compensado resinado apresentou cerca de 1% de partículas que foram descartadas (Figura 47a), para possível produção da argamassa. Na Figura 47b, observa-se a configuração do resíduo utilizado, com partículas abaixo da peneira de 4,8mm de diâmetro de abertura.



**Figura 47: Exemplo de compensado resinado: (a) resíduo descartado; (b) resíduo utilizado no compósito**

#### 3.3.1 Dosagem de argamassa

O traço da argamassa que foi utilizado nesta pesquisa exploratória constitui-se de 1:4 (cimento: areia) em volume, para facilitar sua reprodução em obra. Porém, a referência de traços de argamassa para a realização do trabalho em laboratório também foi feita a partir de medição em massa dos agregados (Apêndice B).

A pesquisa produziu argamassas, com substituição parcial do volume de areia por resíduos, gerando corpos de prova para a análise no tubo de impedância. Dosagens experimentais com diferentes teores de aglomerante, agregados e água foram aplicadas nas distintas argamassas realizadas (0%, 5%, 10%, 25%, 50% de substituição de areia) por resíduos, em volume até alcançarem o Índice de Consistência adequado. O Índice de Consistência padrão, para revestimento, foi determinado pela NBR 13276 (2005) sendo fixado em  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  na mesa de consistência, para a argamassa de referência. Para a realização da argamassa, manteve-se controlada a temperatura ( $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ ) e a umidade relativa ( $UR = 70\% \pm 10\%$ ) na sala climatizada.

Para a produção das argamassas foi utilizada um misturador planetário, marca Emic, modelo AG-5, com capacidade de 5L.

O tempo de mistura e a seqüência dos materiais utilizados foram determinados e mantidos em todas as dosagens, seguindo as especificações da NBR 13276 (2005). Durante 90 segundos, em velocidade baixa, foram misturados a areia, o resíduo, o cimento e a água. Após os 90 segundos, para homogeneizar a argamassa à base de cimento com adição, foram acrescentados mais 30 segundos de mistura, porém manualmente (Figura 48).



(a)



(b)

**Figura 48: Produção de argamassa: (a) argamassadeira planetária; (b) mistura manual**

Em seguida, mediu-se a consistência, para verificar se a mistura apresentava o índice de consistência adequado (Figura 49 e Figura 50). Assim, fixou-se a quantidade de água para aquela argamassa. Nas demais composições, o processo se repetiu até encontrar-se a consistência, acrescentando ou diminuindo a quantidade de água utilizada na mistura. Isso se deve ao fato de que os vários resíduos utilizados se comportavam de maneiras diferentes,

uns possivelmente absorvendo mais água que os outros, modificando, dessa maneira, a sua trabalhabilidade, devido provavelmente a esse fator e às formas irregulares de seus grãos.



(a)



(b)

**Figura 49: Moldagem do ensaio de índice de consistência: (a) material utilizado para o ensaio; (b) compactação da argamassa.**



(a)



(b)

**Figura 50: Moldagem do ensaio de índice de consistência: (a) medição do índice de consistência; (b) três medidas para avaliar o índice de consistência da argamassa.**

Na Tabela 9, apresenta-se o teor de água encontrado para as diferentes argamassas. Nota-se que, com o acréscimo de resíduo, foi necessário o aumento de água para alcançar a consistência fixada e manter, assim, trabalhabilidade similar. O resíduo de compensado de madeira foi o que exigiu mais água, seguido da casca de arroz e por último do contraforte. Provavelmente o contraforte termoplástico (não tecido) empregado, absorveu menos água, pois sua composição é à base de polímeros, derivados do petróleo, não contendo material orgânico em sua composição.

**Tabela 9: Teores de água obtidos/encontrados**

Argamassa Compósito	Teor de Resíduo (%)	IC (mm)	Teor de Água (%)
Referência	0	260±5	11,85
	5	260±5	12,80
Compensado resinado	10	260±5	14,42
	25	260±5	16,49
	50	260±5	21,21
	5	260±5	11,59
Casca de arroz	10	260±5	12,36
	25	260±5	14,30
	50	260±5	20,47
	5	260±5	11,59
Contraforte	10	260±5	11,68
	25	260±5	13,61
	50	260±5	16,71
	5	260±5	11,59

### 3.3.2 Moldagem e produção dos CPs

Os CPs foram moldados de forma escalonada no tempo, com um resíduo diferente a cada semana, ficando prontos para a análise com um intervalo de tempo na mesma proporção. Os moldes em PVC utilizados para a confecção dos CPs possuíam o diâmetro utilizado no Tubo de Impedância, para que estes se encaixassem perfeitamente, existindo folga de menos de 1 mm entre os CPs e o porta-amostra ( $\varnothing$  100mm) devido apenas à retração. O fundo da forma é plano. Para não interferir na análise de absorção das ondas sonoras não foram colocadas formas superiores, obtendo-se uma superfície mais próxima a de uma aplicação em obra. Foram utilizadas lâminas de vidro, com desmoldante a base de óleo, para emparelhar e manter plana a base dos corpos de prova (Figura 51).



**Figura 51: Moldagem dos CPs: (a) Moldes de PVC utilizados para a confecção dos CPs; (b) CPs de argamassa com laminas de vidro como base, com desmoldante a base de óleo**

Foram moldados dois CPs para cada combinação de teor de resíduo, e estes foram utilizados para análise de teste com três medições distintas de cada parâmetro acústico, não sendo necessária a troca do CP, pois esta não altera suas propriedades durante as análises. Isso



se justifica, pois as medições acústicas são mais complexas e desconhecidas do que a moldagem dos CPs; ou seja, a variabilidade na mistura da argamassa é potencialmente menor do que a das medidas de acústica.

Os CPs de argamassa tiveram um tempo de cura de 28 dias, sendo que durante as primeiras 48h  $\pm$ 24h permaneceram nos moldes, na sala climatizada, com temperatura e umidade relativa controladas, conforme norma NBR 13276 (2005). Após esse período, os CPs foram desmoldados e armazenados em recipientes com água e cal, ainda na sala climatizada, onde continuaram até sua cura total (Figura 52a). Os poros influenciam no comportamento acústico, portanto há importância da cura dos CPs e do teor de água. Após esse período, os mesmos foram retirados da água e ficaram armazenados na sala climatizada até estabilizarem a umidade e alcançarem constância de massa, adotando-se como parâmetro a variação abaixo de 1% entre medições, sendo considerados secos com uma conformação adequada para os testes (Figura 52b).



(a)



(b)

**Figura 52: Cura dos CPs: (a) CPs em processo de cura; (b) CPs em processo de secagem - sala climatizada**

A utilização da estufa para estimular a perda total de umidade para cada corpo de prova dos distintos compósitos foi descartada, devido à aparente fragilidade das amostras, que continham material orgânico em sua composição, não havendo referências anteriores que comprovassem a eficácia e o comportamento dos CPs, podendo ocasionar o rompimento e comprometendo assim algumas propriedades dos mesmos.

Após a secagem, os CPs foram embalados individualmente em sacos plásticos, devidamente selados e identificados, para não permitir a troca gasosa e absorção de umidade do ar, permanecendo armazenados no laboratório de materiais da Universidade até a realização das medições (Figura 53).



**Figura 53: Configuração dos CPs: (a) CPs prontos para serem medidos; (b) CPs embalados individualmente em sacos plásticos para impedir absorção da umidade do ar**

### **3.4 INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS ATRAVÉS DO TUBO DE IMPEDÂNCIA**

As atividades desta etapa constituíram-se de: procedimentos empregados na construção do tubo de impedância e medição dos parâmetros acústicos.

#### **3.4.1 Construção e caracterização do tubo de impedância**

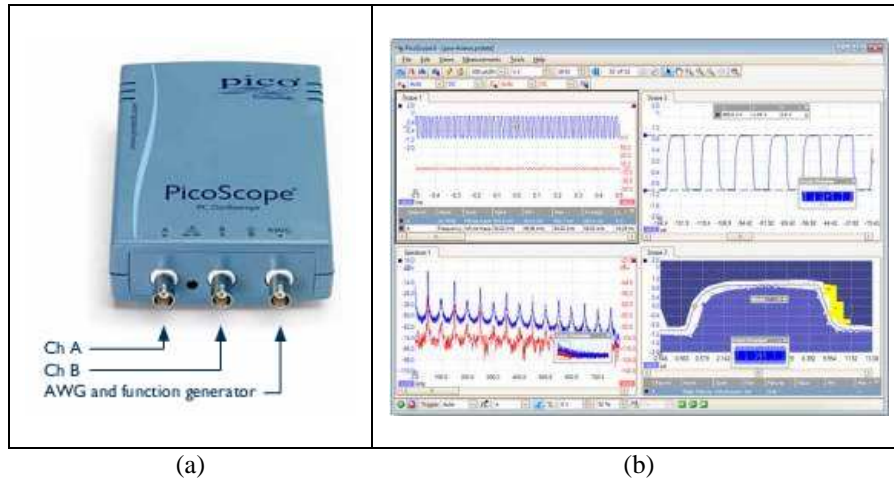
A construção do tubo de impedância foi realizada na UNISINOS e seguiu o recomendado na literatura e nas normas ISO, utilizando materiais comuns, como tubo de aço, com baixo custo de aquisição (ISO, 1996; 1998; O'MALLEY, 2001; SALVO et al., 2005; SEYBERT, 1977; SILVA et al., 2008) (Figura 54). A caracterização foi obtida através do uso dos materiais isolantes convencionais, os quais têm propriedades conhecidas (lã de vidro e espuma acústica).



**Figura 54: Tubo de impedância utilizado**

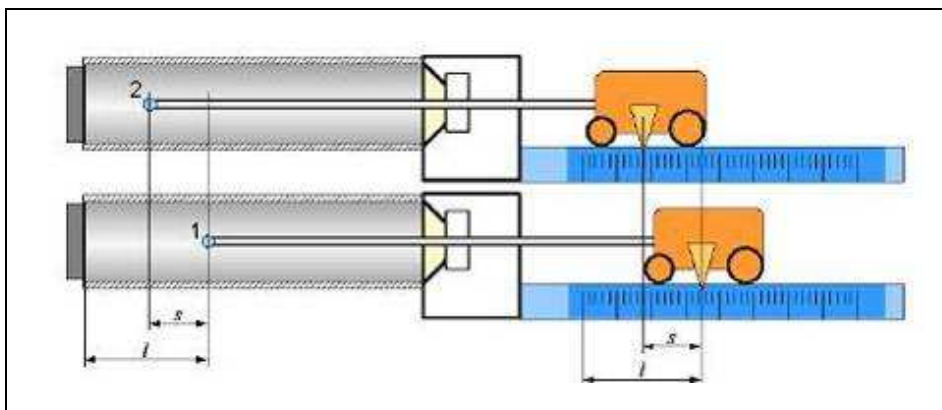


O equipamento de aquisição de dados empregado foi o PicoLog, data logger PicoScope 2203 (Figura 55), com dois canais de medição e gerador de sinais, conectado a um notebook; o amplificador tem 36W RMS.



**Figura 55: Equipamento de aquisição de dados: (a) PicoScope 2203; (b) janela de programa**

O método empregado no trabalho: um microfone foi mantido no centro da seção transversal do tubo, sendo que este se movimentava ao longo do tubo (Figura 56). Para captar e determinar a pressão sonora no interior do mesmo, foi necessária a instalação de uma sonda sonora, um movimentador e uma régua de marcação. Na parte inicial da sonda, foi colocado um microfone de eletreto de 1/4", sendo que as medições foram obtidas com auxílio de uma régua numérica.

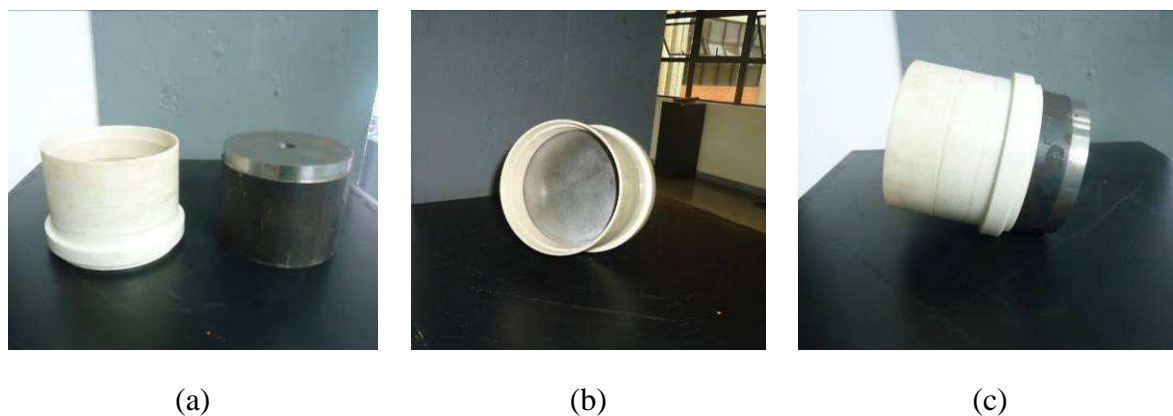


**Figura 56: Detalhe do posicionamento do microfone no tubo de impedância**

Fonte: Massarani; Nabuco de Araujo (2008)

As faixas de frequências contidas entre 200 Hz a 2000 Hz foram as estudadas, obtendo-se, assim, os índices de absorção sonora dos corpos de prova (CPs) analisados. As frequências-limites são determinadas de acordo com o comprimento e diâmetro do tubo, sendo que o tubo confeccionado apresentou 1,03 m de comprimento e 100 mm de diâmetro interno.

Na Figura 57, são apresentadas as características do porta-amostra, possuindo formato cilíndrico, com 100 mm de diâmetro interno.



**Figura 57: Porta-amostra: (a) porta amostra de PVC e anteparo de aço; (b) vista frontal do fundo do porta amostra; (c) vista lateral.**

Na medição, cabe ressaltar que a exata colocação do corpo-de-prova dentro do porta-amostra, observando a não existência de folgas, resultou em uma situação favorável para as medições nas frequências até 2000 Hz, o que melhorou a qualidade dos ensaios.

### 3.4.2 Medição dos parâmetros acústicos e análise dos resultados

O parâmetro que foi mensurado no tubo de impedância foi o coeficiente de reflexão ( $R$ ), a partir do qual se calcula o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha = 1 - R^2$ ). Para cada propriedade acústica foram tomadas três medidas. Foi realizada análise estatística básica (médias e desvios-padrão), ANOVA e regressão, buscando modelos que permitam compreender melhor os fenômenos.

## 3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS AVALIADAS E MÉTODOS DE ENSAIO

### 3.5.1 Medição da densidade aparente<sup>1</sup>

Para este ensaio, os CPs confeccionados foram medidos com paquímetro, sendo utilizada uma balança eletrônica de precisão da marca Marte Balanças, modelo AS 5000, com precisão de 0,1g, para verificar a massa.

A realização do procedimento experimental seguiu a norma ASTM D1622-08, que calcula a densidade aparente de acordo com a Equação (12):

---

<sup>1</sup> A densidade refere-se a medida de massa de um determinado volume de material sem descontar os vazios existentes no mesmo.

$$D=m/V \quad (12)$$

Sendo:

- $D$  = densidade aparente ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
- $m$  = massa ( $\text{Kg}$ )
- $V$  = volume ( $\text{m}^3$ )

### 3.5.2 Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão e à compressão

Os resultados obtidos na primeira parte foram utilizados para definir as configurações (teor de adição x material) que apresentassem maior absorção sonora sendo estas adotadas para a produção de CPs com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, para testar a sua resistência à tração na flexão e à compressão

No Laboratório de Materiais da UNISINOS, foram realizados os testes de resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas ensaiadas em estado endurecido. A norma NBR 13279 (2005) estabelece o método, seguindo procedimentos habituais do laboratório.

Os CPs foram desmoldados em  $48\text{h} \pm 24\text{h}$ , de acordo com a NBR 13279 (2005). Durante 28 dias os CPs permaneceram na sala climatizada ( $T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR} = 70\% \pm 10\%$ ), para realização de sua cura (Figura 58a). Através de uma máquina universal de ensaio da marca Emic, modelo DL 2000, Classe 1 de calibração, com erro  $\leq 5\%$ , foram efetuados os testes no 28º dia (Figura 58b). Na Figura 59 apresentam-se, para ensaios de resistência, os CPs de 50% de resíduo e o CP de referência, sem adição de resíduos.



(a)



(b)

**Figura 58: Configuração dos CPs para ensaios de resistência: (a) CPs armazenados na sala climatizada para processo de cura; (b) Máquina prensa para realização dos ensaios de tração à flexão e compressão.**



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 59: Conformação dos CPs analisados no ensaio de resistência: (a) CPs de referência, sem adição de resíduos; (b) CPs com adição de compensado resinado; (c) CPs com adição de casca de arroz; (d) CPs com adição de contraforte**



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, os resultados são abordados e discutidos, enfatizando as análises de características acústicas dos compósitos de argamassa com resíduos. Como relatado no capítulo anterior, foram realizados ensaios para medição do coeficiente de reflexão sonora em CPs com diferentes dosagens de resíduos de compensado resinado, casca de arroz e contraforte de calçado pelo método do tubo de impedância acústica. Com esta medida, calcula-se o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ).

Nas figuras apresentadas a seguir são analisados gráficos, onde o eixo horizontal foi constituído de faixas de frequências de 200 a 2000 Hz e o eixo vertical de valores que correspondem ao coeficiente de absorção acústica (variando de 0 a 1). A faixa de frequência adotada é a convencional, conforme Tabela 5.

Para facilitar o entendimento, primeiramente são apresentados os resultados de análise acústica das diferentes composições do mesmo resíduo. Após esses estudos, foram confrontados os resultados, comparando os diferentes resíduos, mas em compósitos que possuíam o mesmo teor de substrato, sempre adotando, como base de comparação, os materiais convencionais (lã de vidro e a espuma acústica), segundo dados de Bistafa (2006).

### **4.1 MEDIÇÕES PRELIMINARES**

Com a finalidade de verificar a margem de erro e calibrar o tubo de impedância, antes de iniciar as medições, foram realizadas análises com o tubo vazio e fechado, onde o fundo do porta-amostra possuía superfície lisa e massiva, sendo o material utilizado o aço. Verificou-se que os valores encontrados de índice de absorção sonora ficaram bem próximos de zero ( $\alpha = 0,0277$ ), o que indicou uma medição adequada, pois sabe-se que materiais com superfícies lisas e duras dificilmente absorvem as ondas sonoras, refletindo-as quase que totalmente.

### **4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE COMPENSADO RESINADO**

Os corpos de prova, contendo diferentes teores de resíduos de compensado resinado, foram investigados quanto à massa e espessura e, posteriormente, calculou-se a

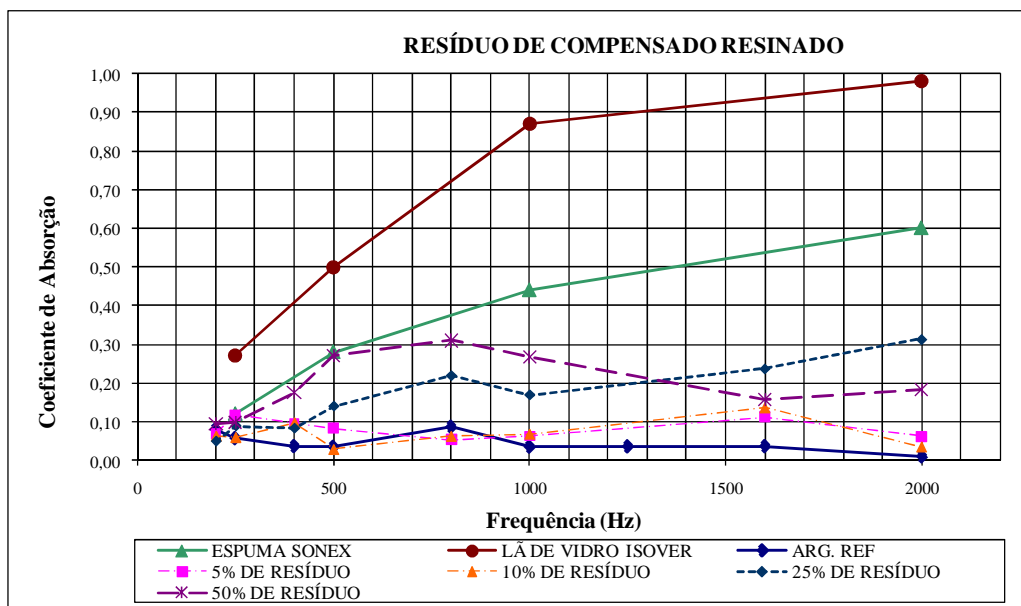
densidade aparente. Estes dados, apresentados na Tabela 10, são importantes para auxiliar na comparação com os materiais acústicos encontrados no mercado e avaliar os resultados.

**Tabela 10: Dados referentes aos CPs com compensado resinado e materiais convencionais**

Material	Teor de Resíduo (%)	Massa (g)	Espessura (mm)	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Compensado resinado	0%	294,25	20	1952,90
	5%	287,07	20	1827,50
	10%	272,50	20	1734,78
	25%	239,36	20	1523,80
	50%	148,60	20	946,00
Lã de vidro*	-	5,90	25	30,00
Espuma acústica*	-	5,00	20	32,00

\* Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

A Figura 60 demonstra os valores encontrados para as diferentes porcentagens de resíduo de compensado resinado em todas as frequências testadas (Apêndice C) e também as curvas para os materiais convencionais.



**Figura 60: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de argamassa com resíduo de compensado resinado e materiais convencionais\***

\*Fonte Materiais convencionais: Bistafa (2006)

Antes de analisar os resíduos, foi necessário avaliar o comportamento do corpo de prova sem substituição. O compósito de referência, com 0% de resíduo, alcançou um coeficiente de absorção sonora abaixo das outras configurações, obtendo pico máximo de 0,08 de absorção sonora em 800 Hz, sendo este, um resultado bastante significativo e esperado.

Ainda nesse sentido, foi possível observar, na Figura 60, que os compósitos com 5% e 10% de resíduo de compensado resinado apresentaram similaridade, absorvendo até 0,13 de onda sonora na frequência de 1600 Hz. Porém, estes compósitos apresentaram desempenho um pouco inferior em relação aos compósitos de 25% e 50% de resíduo, que alcançaram coeficiente de absorção sonora de 0,31, em frequências de 2000 Hz e 800 Hz, respectivamente.

O compósito de 50% de resíduo de compensado resinado mostrou-se aparentemente superior, pois nas frequências entre 300 e 1350 Hz, obteve resultados superiores de absorção sonora quando comparada aos outros compósitos. Caso este que se alterou em frequências mais altas, como em 2000 Hz, em que os resultados do compósito de 50% demonstraram-se menores, sendo ultrapassados pelo compósito de 25%, que alcançou patamares de 0,31 de coeficiente de absorção, correspondendo a 0,14 a mais de absorção que a configuração de 50%.

Considerando o coeficiente de redução de ruído (NRC), na Tabela 11 são apresentados os dados obtidos para as amostras de compensado resinado. O compósito de referência alcançou um coeficiente de redução de ruído (NRC) de 0,0343. Cabe ressaltar que este resultado estava dentro do esperado, pois existem estudos que verificaram que o reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos apresenta um índice de 0,0375 de coeficiente de redução de ruído, segundo Bistafa (2006).

**Tabela 11: Coeficientes de absorção acústica ponderado referentes aos CPs com compensado resinado e de materiais convencionais**

MADEIRA	CPs com Compensado Resinado					Materiais Convencionais*	
	Teor de Resíduo	0% (Ref.)	5%	10%	25%	50%	Lã de Vidro
NRC	0,0343	0,0813	0,0478	0,1773	0,2052	0,6600	0,3600

\*Fonte: Bistafa (2006)

Na Tabela 11, observa-se ainda que o valor NRC do compósito de referência encontrou-se abaixo de todas as outras medições das configurações analisadas, o que pode indicar que este compósito absorve menos som, quando comparada aos compósitos que continham resíduo de compensado resinado (de 0,0478 a 0,2052).

Comparando os coeficientes de redução de ruído (NRC) de todas os compósitos com resíduos, nota-se que o compósito com 50% de resíduo de compensado de madeira possuiu maior valor (0,2052), seguido de 25% (0,1773), 5% com (0,0813) e por último o compósito com 10 %, com (0,0478). Todos estes compósitos apresentaram valores de NRC



abaixo dos índices descritos pelos materiais convencionais à venda no mercado, sendo que a espuma acústica (0,36) foi a que mais se aproximou dos resultados. Contudo, é importante frisar que os compósitos com resíduos superaram a argamassa de referência no aspecto da absorção acústica, o que significa um ganho importante na absorção acústica.

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE CASCA DE ARROZ

Da mesma forma que para o compensado, a massa, a espessura e a densidade aparente foram medidas e calculadas com base nos corpos de prova moldados. Os dados contidos na Tabela 12 demonstram estes valores.

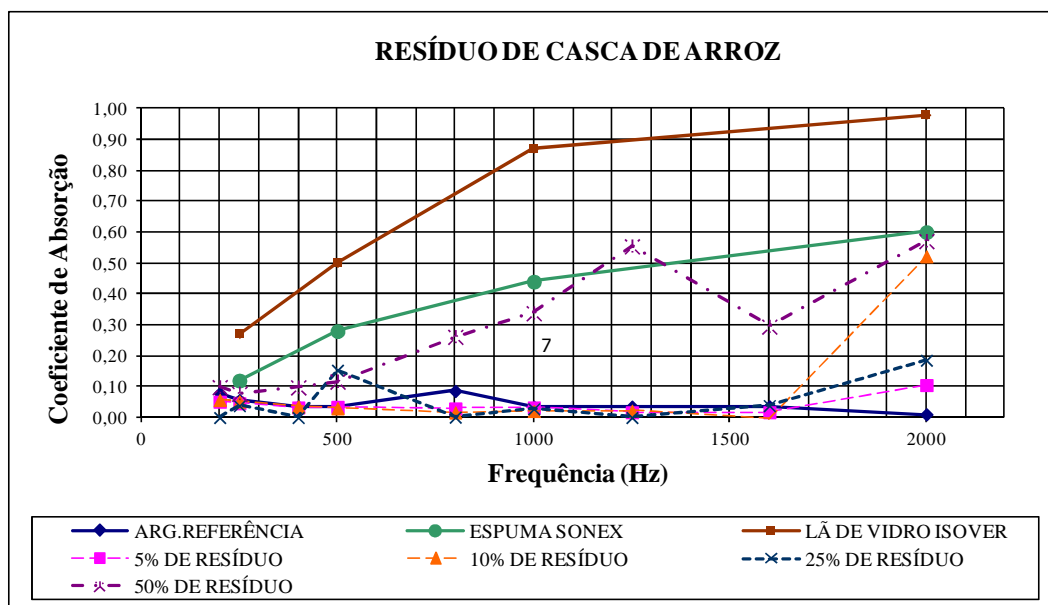
**Tabela 12: Dados referentes aos CPs com casca de arroz e materiais convencionais**

Material	Teor de Resíduo (%)	Massa (g)	Espessura (mm)	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Casca de arroz	0%	294,25	20	1952,90
	5%	303,43	20	1931,70
	10%	298,12	20	1897,90
	25%	281,85	20	1794,90
	50%	209,00	20	1330,50
Lã de vidro*	-	5,90	25	30,00
Espuma acústica*	-	5,00	20	32,00

\* repete-se os materiais convencionais para conveniência do leitor

Na Figura 61, o gráfico apresenta os valores encontrados para as diferentes dosagens de resíduo de casca de arroz nas frequências testadas (dados Apêndice D) e juntamente as curvas para os materiais convencionais.

Na Figura 61 destacou-se o compósito com 50% de casca de arroz, que demonstra melhor resultado quando comparada com as outras configurações. Constatou-se também que, com exceção do compósito de 50% de resíduos, todas as outras apresentaram resultados similares de absorção sonora, nas frequências entre 800 a 1500 Hz, porém inferiores, próximas a 0,05 de coeficiente de absorção, em comparação aos 0,55 do compósito com maior dosagem de resíduo.



**Figura 61: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de casca de arroz e materiais convencionais\***

\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

O compósito com 10% de casca de arroz sobressaiu-se nas altas frequências, alcançando picos de 0,50 de coeficiente de absorção sonora, em 2000 Hz, cujo comportamento esteve bem próximo ao compósito de 50%. Os demais compósitos, com 5% e 25%, apresentaram resultados inferiores, não ultrapassando 0,10 e 0,20 de coeficiente de absorção sonora, respectivamente.

Analisando os coeficientes de redução de ruído (NRC) da casca de arroz, apresenta-se a Tabela 13. Destaca-se o compósito com 50% de resíduo, que apresentou o maior coeficiente de redução de ruído (0,2757), seguido de 10% (0,1562), 25% (0,1014) e, por último, 5% (0,0546). Percebe-se também, que todos compósitos de casca de arroz apresentaram maior coeficiente de redução de ruído quando comparadas com o compósito de referência, dado esse importante, pois aparentemente demonstra a influência, na absorção acústica, do resíduo incluído no compósito.

**Tabela 13: Coeficientes de absorção acústica ponderado referentes aos CPs com casca de arroz e de materiais convencionais**

CASCA DE ARROZ	CPs com Casca de Arroz					Materiais Convencionais*	
	0% (Ref.)	5%	10%	25%	50%	Lã de Vidro	Espuma Acústica
NRC	0,0343	0,0546	0,1562	0,1014	0,2757	0,6600	0,3600

\*Fonte: Bistafa (2006)

Comparando os compósitos com os materiais convencionais, a composição de 50% aproximou-se bastante do desempenho da espuma acústica, fato que alenta este e novos estudos para desenvolver compósitos mais compatíveis com os materiais convencionais.

#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPÓSITOS COM RESÍDUO DE CONTRAFORTE DE CALÇADO

Os dados a respeito dos corpos de prova com massa, espessura e densidade aparente, estão apresentados na Tabela 14.

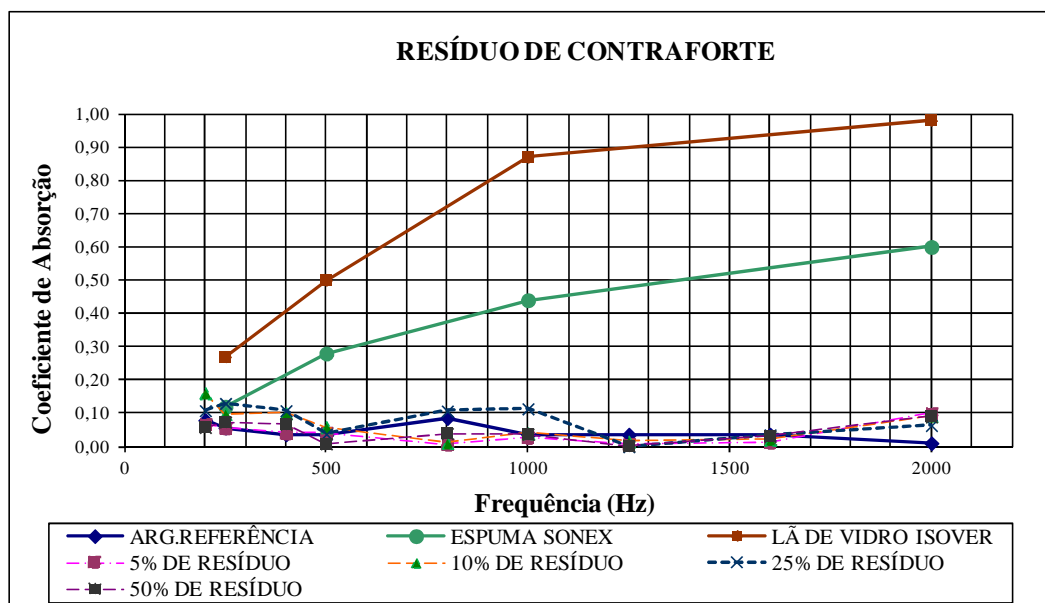
**Tabela 14: Dados referentes aos CPs com contraforte de calçado e materiais convencionais\***

Material	Teor de Resíduo (%)	Massa (g)	Espessura (mm)	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Contraforte de calçado	0%	294,25	20	1952,90
	5%	312,90	20	1992,00
	10%	314,50	20	2002,20
	25%	284,03	20	1808,20
	50%	251,60	20	1601,70
Lã de vidro*	-	5,90	25	30,00
Espuma acústica*	-	5,00	20	32,00

\* repete-se os materiais convencionais para conveniência do leitor

Na Figura 62 os valores encontrados para as diferentes dosagens de resíduo de contraforte em todas as frequências testadas (Apêndice E), e também as curvas para os materiais convencionais.

Observando a Figura 62, conclui-se que as curvas dos cinco compósitos analisados apresentaram valores para coeficiente de absorção sonora similares, não ultrapassando 0,1 de coeficiente sonoro. Notou-se que os valores de absorção sonora para o compósito com 25% de resíduo de contraforte foram os mais altos nas frequências entre 600 Hz e 1200 Hz, alcançando até 0,12 de coeficiente de absorção. Acima dessas frequências, seus valores diminuem, sendo ultrapassados pelos compósitos de 5%, 10% e 50%, em 2000 Hz, que alcançaram de 0,08 a 0,10 de coeficiente de absorção, em contraponto aos 0,06 do compósito de 25%.



**Figura 62: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de contraforte de calçado e materiais convencionais**

\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

Já nas frequências de 1000 Hz a 2000 Hz, a comparação dos compósitos de 5%, 10% e 50% de resíduo de contraforte apresentou semelhança, e as curvas variaram pouco, sendo que em 2000 Hz, o compósito de 5% obteve melhor desempenho. Nas frequências anteriores, o compósito de 10% e 50% se mantiveram com melhor absorção, alcançando picos de 0,04 de coeficiente de absorção em 1000 Hz. Nas baixas frequências, destacaram-se compósitos de 25% e 10% que chegaram a obter 0,11 e 0,10 de coeficiente de absorção respectivamente.

Na Tabela 15 são apresentados os dados dos coeficientes de redução de ruído (NRC), obtidos para as amostras de contraforte de calçado.

**Tabela 15: Coeficientes de absorção acústica ponderado referentes aos CPs com contraforte de calçado e de materiais convencionais**

CONTRAFORTE	CPs com Contraforte de Calçado					Materiais Convencionais*		
	Teor de Resíduo	0% (Ref.)	5%	10%	25%	50%	Lã de Vidro	Espuma Acústica
NRC		0,0343	0,0561	0,0723	0,0864	0,0523	0,6600	0,3600

\*Fonte: Bistafa (2006)

Quando se analisam os compósitos de contraforte de calçado, observa-se que seus coeficientes de redução de ruído encontraram-se acima de 0,0343, medida do CP de referência (0%). Observou-se que, em primeiro lugar, encontrou-se o compósito com 25% de resíduo (0,0864), seguido dos compósitos de 10% (0,0723) e 5% (0,0561) e por último o compósito de 50% (0,0523). Esses dados indicaram que quando ocorreu um acréscimo superior a 25% de

resíduo, houve uma diminuição na absorção sonora. Embora em valores pequenos de  $\alpha$ , parece que a quantidade de resíduo pode influenciar no desempenho do compósito de argamassa com contraforte. Além disso, os compósitos de 10% e 25% evidenciaram coeficientes de redução de ruído muito semelhantes, o que demonstrou que uma pequena quantidade de resíduo pode ser suficiente para proporcionar uma considerável variação de absorção sonora (em relação à argamassa de referencia).

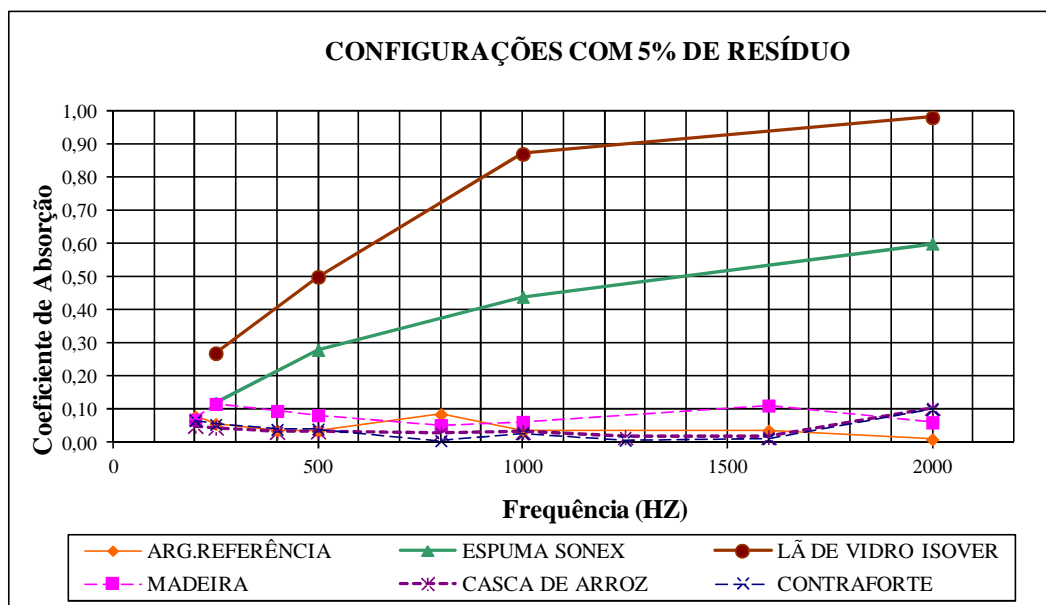
Quando se comparam os NRCs dos corpos de prova de contraforte com os índices dos materiais convencionais, observa-se que, como ocorrido com o compensado resinado, o contraforte também obteve valores abaixo dos indicados pelos materiais convencionais, porém neste caso a diferença foi maior.

#### **4.5 ANÁLISE DO NRC DE ACORDO COM A DOSAGEM**

Nesta seção são comparados os resultados de coeficientes de absorção sonora encontrados com diferentes resíduos, porém considerando a mesma dosagem adicionada ao compósito. Esta análise visa estabelecer parâmetros de desempenho, adotando também como base de comparação a lã de vidro e a espuma acústica.

##### **4.5.1 Comparação entre os compósitos com dosagem de 5%**

Na Figura 63, o gráfico demonstra os resultados do ensaio de absorção acústica encontrados para os CPs com dosagem de 5% para os diferentes resíduos, nas frequências testadas.



**Figura 63: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de dosagens de 5% e materiais convencionais\***

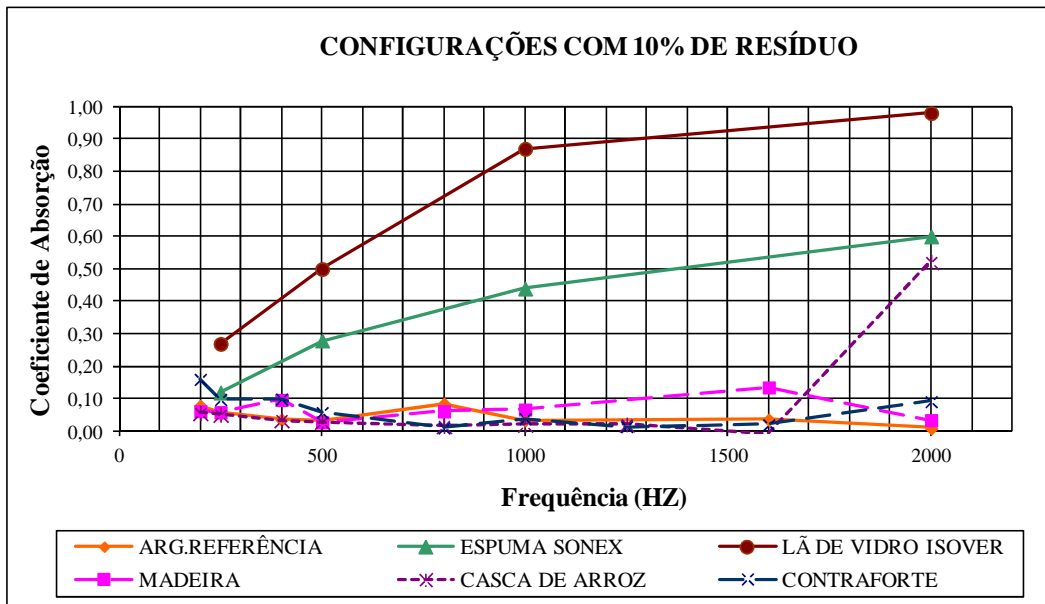
\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

Comparando estes dados entre si, pode-se observar que os valores foram bastante aproximados entre os CPs com casca de arroz e os obtidos com contraforte. Nas duas amostras, o maior valor de coeficiente de absorção aconteceu na frequência de 2000 Hz, com 0,10 de absorção sonora. Quando se utilizou o resíduo de compensado resinado, encontraram-se valores de coeficientes de absorção maiores que os anteriores, em praticamente todas as frequências mensuradas. Nos NRCs encontrados na Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15 pode-se evidenciar o maior valor de NRC para o compensado resinado (0,0813) e a similaridade dos valores encontrados para a casca de arroz (0,0546) e para o contraforte (0,0561).

Contudo, para os três resíduos o  $\alpha$  medido apenas não superou o nível de 0,10. Aparentemente a dosagem de 5% de adição de resíduo nos compósitos influenciou pouco na absorção acústica, se aproximando a valores encontrados na amostra do CP de referência. Quanto aos materiais convencionais, estes apresentaram clara superioridade quando comparados aos compósitos de 5% de resíduo.

#### 4.5.2 Comparação entre os compósitos com dosagem de 10%

Na Figura 64, o gráfico apresenta os valores de coeficientes de absorção sonora para a dosagem de 10%, com resíduos diferentes, nas frequências estudadas.



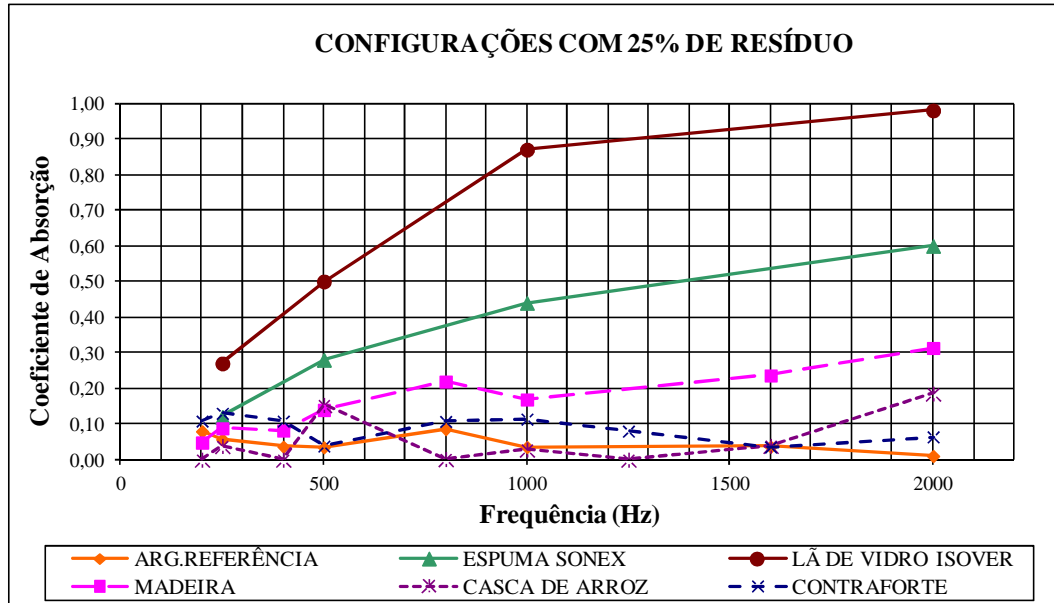
**Figura 64: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de dosagens de 10% e materiais convencionais\***

\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

Observa-se que os valores de absorção sonora para o compósito com 10% com resíduos de contraforte e com casca de arroz apresentaram resultados aproximados, com coeficientes de absorção sonora entre 0 e 0,10. O resíduo de compensado resinado demonstrou resultado um pouco superior, quando alcançou o pico de coeficiente de absorção de 0,13 em 1600 Hz. Em frequências mais altas, a casca de arroz obteve destaque, atingindo 0,45 de coeficiente de absorção sonora, em 2000 Hz, aproximando-se, assim, de valores encontrados para a espuma acústica (0,50 de coeficiente sonoro), embora este resultado não seja confirmado pelo restante do espectro de frequências, e possivelmente esta medida seja menos confiável. Devido a esta elevada medida, os NRCs analisados na Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15, demonstraram que a casca de arroz (0,1562) apresentou valores superiores, seguido do contraforte (0,0723) e por fim, o compensado resinado (0,0478). Embora repetidas medidas tenham confirmado este patamar, o valor parece ser fruto de uma irregularidade ou comportamento anômalo, visto que contraria as demais medidas.

#### 4.5.3 Comparação entre os compósitos com dosagem de 25%

Na Figura 65, o gráfico evidencia os resultados encontrados nos coeficientes de absorção sonoros com configuração de 25% de resíduos, nas frequências analisadas.



**Figura 65: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de dosagens de 25% e materiais convencionais\***

\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

Verifica-se que os resultados do resíduo de compensado resinado demonstraram resultados mais significativos, porém os demais resíduos apresentaram pouca semelhança. Por sua vez, o compósito com casca de arroz não manteve uma linealidade, variando bastante seus resultados. O contraforte obteve valores acima dos encontrados no CP de referência.

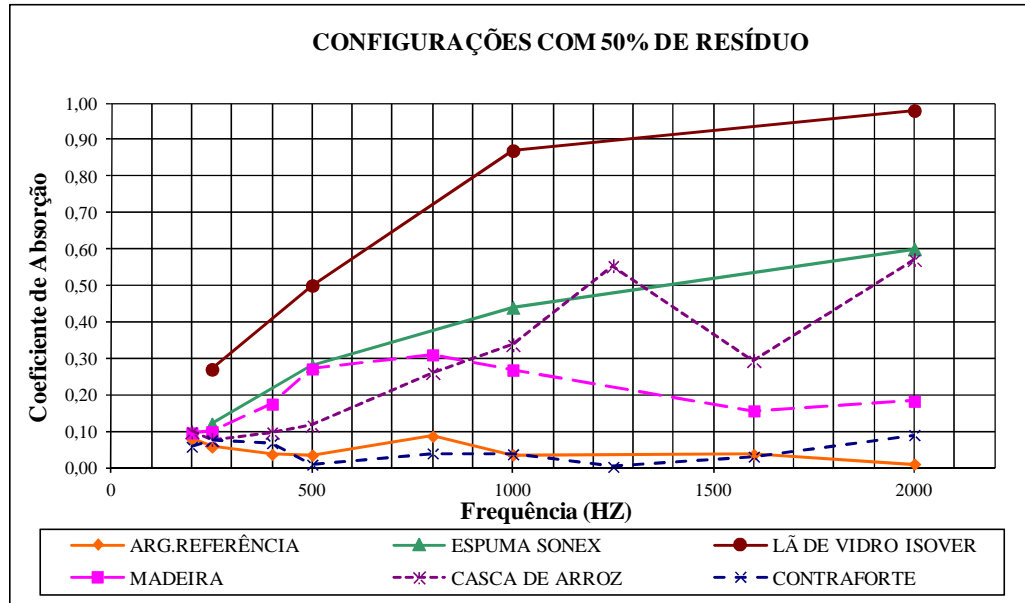
Portanto a dosagem de 25% representa um importante incremento na absorção acústica dos compósitos, atingindo valores próximos a 0,30 (compensado resinado) e 0,20 (casca de arroz) para coeficientes de absorção acústica, aproximando-se da espuma acústica (0,50 em 2000 Hz), um material convencional.

Analisando os NRCs da Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15, observou-se que o compensado resinado (0,1773) apresentou-se em destaque, seguido da casca de arroz (0,1014) e do contraforte (0,0864).

#### 4.5.4 Comparação entre os compósitos com dosagem de 50%

Estão representados, na Figura 66 os valores encontrados para a dosagem de 50%, com diferentes resíduos.





**Figura 66: Resultados de coeficiente de absorção sonora referentes aos CPs de dosagens de 50% e materiais convencionais\***

\*Fonte materiais convencionais: Bistafa (2006)

Com o acréscimo de fibras, o comportamento das amostras apresentou aparentemente um aumento razoável no coeficiente de absorção nas frequências mais altas, com picos de 0,30 de coeficiente de absorção em 800 Hz, para o compensado resinado, e 0,55 para a casca de arroz em 1250 Hz. O contraforte demonstrou resultados inferiores, ficando próximo à composição de referência. O compensado resinado aproximou-se da espuma acústica nas baixas frequências, e a casca de arroz aproximou-se nas altas frequências.

A comparação dos valores de NRCs dos três compósitos indicou que a casca de arroz (0,2757) é superior ao compensado resinado (0,2052) e ao contraforte (0,0523), quando em dosagem de 50% de resíduo, em termos de absorção acústica.

#### 4.5.5 Considerações finais

Nas medições de coeficiente de absorção sonora, todos os compósitos com substituição parcial da areia por resíduos (5%, 10%, 25% e 50%) apresentaram desempenho superior, com valores aparentes de absorção acústica maiores que o compósito de referência. Aparentemente os resíduos podem interferir na absorção acústica em argamassas. Os resultados encontrados de NRC indicaram que o compensado resinado se destacou dos demais resíduos, nos compósitos de 5% e 25%, sendo que os valores encontrados para os CPs de casca de arroz se sobressaíram nas dosagens de 10% e 50%. Já o contraforte foi o resíduo que obteve o menor desempenho em todas as composições.

Tendo em vista as características dos resíduos, pode-se supor que a configuração física (cavidades oriunda dos espaços, poros e estruturas das fibras dos resíduos) influencie na absorção sonora, transformando ondas sonoras incidentes no material em energia térmica. Logo, esperava-se que, quanto maior a porcentagem de resíduo adicionada ao compósito existisse aparentemente maior quantidade de cavidades na face do CP e por consequência, ocorresse maior absorção sonora. Esta hipótese tem amparo nas análises de absorção acústica dos resíduos de compensado resinado e casca de arroz, ao contrário do contraforte, que não seguiu esse comportamento para os compósitos com 50% de resíduo.

## 4.6 ENSAIOS FÍSICOS

### 4.6.1 Ensaio de densidade aparente

Através dos dados medidos nos CPs são demonstradas as densidades aparente dos compósitos de referência, com compensado resinado, casca de arroz e contraforte de calçados (Figura 67).

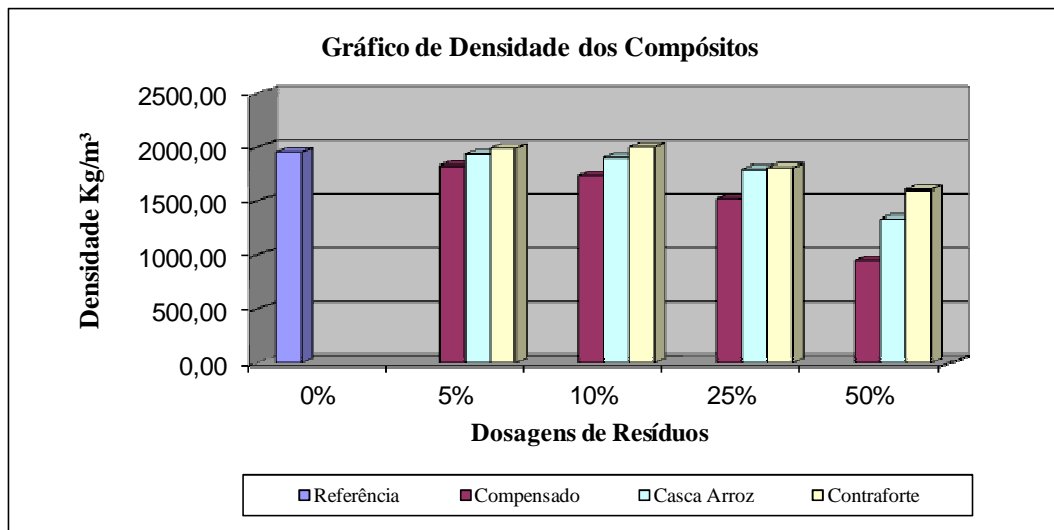


Figura 67: Gráfico de densidade aparente dos compósitos com e sem resíduo

Observa-se nos resultados da Figura 67 que, com o acréscimo de resíduo, houve a diminuição da densidade aparente dos compósitos, de forma distinta nos três resíduos estudados. Para tanto, a massa específica dos resíduos pode ter interferido na densidade aparente, visto que possuem menor massa unitária que a areia substituída (areia:  $1569,02\text{Kg/m}^3$ ; compensado resinado:  $183,78\text{Kg/m}^3$ ; contraforte:  $181,77\text{Kg/m}^3$ ; casca de arroz:  $96,88\text{Kg/m}^3$ ). Porém um comportamento diferente foi observado no CP com adição de

resíduo de contraforte, que nas dosagens de 5% e 10%, aparentemente apresentaram maior densidade aparente que o CP de referência.

Em todas as dosagens, os CPs com compensado resinado apresentaram a menor densidade aparente, mesmo não possuindo a menor massa específica. Porém, a casca de arroz, com menor massa específica, ficou logo em seguida, obtendo a segunda menor densidade aparente.

Sabe-se que, quanto menor a densidade aparente, maior será a quantidade de vazios existentes em uma argamassa quando comparadas as mesmas misturas. Nesta pesquisa, estes vazios/poros se devem, possivelmente, à microestrutura dos materiais (porosidade) e à forma das partículas do resíduo que são, por sua vez, visivelmente mais angulosas e menos esféricas do que os grãos da areia natural (Figura 44). Estes vazios podem influenciar na absorção acústica.

Neste sentido, os CPs de menor densidade aparente apresentaram maiores coeficientes de absorção sonora ponderados, no caso do compensado resinado e da casca de arroz.

#### 4.6.2 Ensaio de Resistência à tração na flexão e à compressão

Verificou-se a influência dos resíduos na resistência à flexão e à compressão da argamassa, no estado endurecido. Sendo assim, através da análise dos resultados de NRC encontrados nos testes optou-se por utilizar a maior dosagem de resíduo para observar a situação potencialmente mais frágil.

A tensão de ruptura de resistência à tração na flexão e na compressão para os CPs com resíduos distintos está representada na Tabela 16, sendo estes realizados através do método de ruptura de três amostras ensaiadas, utilizando a média das mesmas. No Apêndice F e G, encontram-se os dados do ensaio.

**Tabela 16: Tensão de ruptura de resistência à tração na flexão e compressão axial para os resíduos testados**

CP	Flexão (Mpa)	Compressão (Mpa)	NRC*
Referência	1,48	4,53	0,034
CP 50% com compensado resinado	1,05	2,19	0,128
CP 50% com casca de arroz	0,75	1,99	0,147
CP 50% com contraforte	1,22	3,64	0,067

\*Média dos NRCs dos resíduos encontrados na Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15

Observando o comportamento das amostras com os diferentes resíduos, pode-se verificar que todos os CPs se romperam, porém não houve a ruptura total das amostras. Este desempenho era esperado, devido às características dos resíduos que proporcionaram à argamassa uma configuração mais elástica. Porém a configuração de referência se rompeu completamente. Na Figura 68, apresenta-se os CPs depois do teste de resistência à tração na flexão, evidenciando a forma de ruptura. Aparentemente o arrancamento ou escorregamento das fibras podem ter ocasionado fissuras semelhantes, diminuindo a resistência dos CPs.

Já, no teste de resistência à compressão dos CPs, nota-se que o comportamento das amostras também foi semelhantes, quando comparadas entre si. O CP de referência se rompeu completamente, porém os CPs com adição de resíduos não se partiram totalmente, tampouco modificaram sua aparência.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 68: Conformação dos CPs analisados após ensaio de tração à flexão: (a) CPs de referência, sem adição de resíduos; (b) CPs com adição de compensado resinado; (c) CPs com adição de casca de arroz; (d) CPs com adição de contraforte**

Observa-se que os CPs com contraforte apresentaram os melhores resultados, seguidos do compensado resinado e, por último, da casca de arroz, para as duas variáveis de resistência, flexão e compressão. Os CPs de referência demonstraram superioridade

significativa nos resultados, alcançando o dobro de resistência, quando comparados com a hipótese mais frágil, os CPs de casca de arroz. Contudo, com resultados similares, os CPs de compensado resinado e contraforte, destacaram-se na resistência à compressão, principalmente este último, se aproxima mais ao resultado dos CPs de referência.

A resistência mecânica de um material diminui com o aumento da porosidade. Possivelmente os CPs de casca de arroz e compensado resinado podem apresentar maior quantidade de poros em sua microestrutura, e demonstrar maior coeficiente de absorção acústica, como indicado nas análises dos coeficientes de redução de ruído (NRC). A Tabela 16 demonstra que a casca de arroz apresentou menor resistência, porém o maior NRC.

#### 4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para compreender e verificar melhor os fenômenos de absorção acústica, foram analisados modelos estatísticos dos resultados. Seguindo a investigação de influência de variáveis no coeficiente de redução de ruído (NRC), foi realizada análise estatística, empregando as técnicas de análise de variância (ANOVA) e regressão.

Para a confecção do modelo, foram utilizadas a variável dependente NRC e as seguintes variáveis independentes:

- Variável Dependente (**Y**): NRC: calculados a partir das medições no tubo de impedância, variando de 0 a 1;

- Variáveis Independentes (**X<sub>i</sub>**)

Caracterização das Variáveis para confecção do modelo:

**X<sub>1</sub>** – Densidade de massa aparente dos CPs: foram considerados os valores encontrados na pesquisa, medidos em Kg/m<sup>3</sup>;

**X<sub>2</sub>** – Tipo de Resíduo utilizado nos compósitos: variável com valores que variam de 0 a 3; foi considerada a casca de arroz como sendo o resíduo de melhor desempenho acústico, portanto foi atribuído a ela o valor de 3, seguido do compensado resinado que recebeu o valor 1,5; o contraforte, com o valor 1 e, por fim, o CP de referência sem adição de resíduos, com o valor de zero. Esta escala foi determinada através de simulações;

**X<sub>3</sub>** – Teor de Resíduo utilizado: variável com valores de 0%, 5%, 10%, 25% e 50% (0; 0,05; 0,01; 0,25; 0,5), que representam a fração de substituição da areia por resíduos nos compósitos;

A granulometria não foi considerada, pois o gráfico que representou a distribuição granulométrica (Figura 46), demonstrou forma similar para os três resíduos.

#### 4.7.1 Análise de variância (ANOVA)

A ANOVA verifica se existe diferença significativa entre as médias observadas em diferentes situações.

##### 4.7.1.1 Análise de variância com fator duplo: Teor e Tipo de resíduos

Foi realizada uma análise de variância com fator duplo, sem repetição, onde as variáveis estudadas foram o Teor e o Tipo de resíduo. Analisa-se que os valores de  $F_{\text{teste}}$  encontrados foram similares entre as variáveis e ambas inferiores ao  $F_{\text{crítico}}$ , não indicando uma relação de influencia dos teores e tipos de resíduos, atingindo nível de significância abaixo de 95%. Os valores de  $p$  encontrados na Tabela 17, são superiores a 0,05, o que indica que existem erros significativos e não há uma significativa interação entre os fatores, não influenciando o NRC de forma concomitante, ao nível considerado ( $\alpha = 0,05$ ).

**Tabela 17: ANOVA para Teor X Tipo de resíduo**

ANOVA						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{teste}}$	$p$	$F_{\text{crítico}}$
<b>Teor resíduo</b>	0,021311	3	0,007104	1,79846	0,24755	4,757055
<b>Tipo resíduo</b>	0,014037	2	0,007018	1,77685	0,24771	5,143249
<b>Erro</b>	0,023700	6	0,003950			
<b>Total</b>	0,059048	11				

##### 4.7.1.2 Teor de resíduo x NRC

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) investigando a relação entre o Teor de resíduo e o NRC, em três casos, separadamente (casca de arroz, compensado resinado e contraforte). Os resultados demonstraram que a ANOVA não indica influência dos teores de resíduos no NRC, pois os teores não atingiram o nível mínimo de significância. A Tabela 18 sintetiza os valores encontrados <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> NR: Optou-se pela apresentação apenas dos valores de  $F$  e  $p$ , evitando repetições de tabelas similares.

**Tabela 18: Valores de relação de influência dos teores de resíduos sobre o NRC**

<b>Resíduo</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>	<b>F<sub>teste</sub></b>	<b>p</b>
Casca de Arroz	5,318	0,308	0,594
Compensado Resinado	5,318	0,536	0,485
Contraforte	5,318	1,742	0,223
Todos os Teores	4,260	3,250	0,084

Quando investigada a relação de Teor de resíduo e NRC, agora com os três resíduos analisados concomitantemente, observa-se que o valor  $F_{teste}$  encontrado é igual a 3,25 e o  $F_{crítico}$  é 4,26 ao nível de significância de 5%. Portanto, o  $F_{teste}$  é menor que o  $F_{crítico}$ . Com isso conclui-se que não existe diferença significativa entre as médias, podendo ser confirmado também, quando se analisa o valor de  $p$ , que é igual a 0,084 (8,4%), sendo esse, maior que 0,05 (5%).

#### 4.7.1.3 Tipo de resíduo x NRC

Observa-se agora se o Tipo de resíduo apresenta diferença significativa sobre o NRC (Tabela 19). Considerando um nível de significância de 5%, o valor  $F_{crítico}$  é de 4,26 e o  $F_{teste}$  encontrado é igual a 33,09. Sendo o  $F_{teste} > F_{crítico}$ , portanto, pode-se concluir que existe diferença significativa entre as médias. Também se observa que o valor de  $p$  indicado que é igual  $6,3 \times 10^{-6}$ , valor este bem abaixo de 0,05.

**Tabela 19: Valores de relação de influência do Tipo de resíduos sobre o NRC**

<b>Resíduo</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>	<b>F<sub>teste</sub></b>	<b>p</b>
Todos os Tipos	4,26	33,09	$6,3 \times 10^{-6}$

#### 4.7.1.4 Densidade Aparente dos CPs x NRC

Averiguando a relação entre Densidade de massa aparente dos CPs e NRC foi efetuada uma investigação dos três resíduos de forma separada (casca de arroz, compensado resinado e contraforte). As análises realizadas revelam que a ANOVA indica a relação das densidades com o NRC, porque as mesmas alcançaram com folga o nível de significância de 95%. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20: Valores de relação de influência das Densidades Aparentes dos CPs sobre o NRC**

<b>Resíduo</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>	<b>F<sub>teste</sub></b>	<b>p</b>
Casca de Arroz	5,32	235,91	$3,21 \times 10^{-07}$
Compensado Resinado	5,32	81,22	$1,83 \times 10^{-05}$
Contraforte	5,32	609,04	$7,77 \times 10^{-09}$
Todas as Densidades	5,32	81,22	$1,83 \times 10^{-05}$

Dessa forma, todos os resultados dos valores de  $F_{\text{teste}}$  foram superiores ao  $F_{\text{crítico}}$  e, assim, comprova-se que existe diferença significativa entre as médias observadas. Os valores-p encontrados nas diferentes resíduos apresentam-se bastante significativos para a variável densidade, observando resultados inferiores a 0,05. O resíduo contraforte demonstrou maior diferença significativa de interação com o NRC, seguido da casca de arroz e por fim, o compensado resinado.

Continuando a investigação de relação de densidade aparente com o NRC, porém com os três resíduos em conjunto, encontram-se também resultados significativos, que indicam, na Tabela 20, que existe diferença significativa entre médias das densidades e o NRC.

Constata-se através da análise, que a densidade atingiu o nível de significância, sendo o valor de  $F_{\text{teste}}$  apresentado igual a 81,22 e este, maior que  $F_{\text{crítico}} = 5,32$ . O fator é significativo, pois o  $F_{\text{teste}}$  é bastante superior ao  $F_{\text{crítico}}$ , o que indica que a densidade aparente influencia o NRC, o  $p$  apresenta-se inferior a 0,05 no nível de significância investigado.

#### 4.7.2 Regressão

Buscando outra forma de análise dos estudos realizados foram construídos modelos estatísticos de regressão, supondo-se inicialmente uma relação linear entre as variáveis estudadas. A regressão analisa se as variáveis testadas influenciam o NRC. Os dados são o Teor e o Tipo de Resíduo empregado e a Densidade aparente dos CPs, investigando se estes influenciam no coeficiente de redução de ruído (NRC) (ver Tabela 11, Tabela 13, Tabela 15).

No modelo inicial proposto, a forma da equação é expressa pela Equação (13):

$$\text{NRC} = a_0 + a_1 * X_1 (\text{Densidade}) + a_2 * X_2 (\text{Tipo de Resíduo}) + a_3 * X_3 (\text{Teor de Resíduo}) \quad (13)$$



Onde  $a_i$  são os coeficientes da equação, e  $X_i$  são as variáveis independentes e NRC é a variável dependente.

Na Tabela 21, valores mínimos, máximos, médias e desvio padrão das variáveis analisadas.

**Tabela 21: Valores de relação das variáveis**

Variável	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
Y	0,03	0,28	0,11	0,07
$X_1$	946,02	2002,17	1718,74	304,49
$X_2$	0,00	3,00	1,38	1,25
$X_3$	0,00	0,50	0,18	0,20

Foram realizados alguns modelos alternativos. A variável Teor de resíduo não se revelou significativa ao nível de 95% e foi excluída do modelo final. Aparentemente isso se deve a alta correlação com a variável Densidade aparente ( $r = - 0,84$ ), a qual teve desempenho um pouco superior, sendo preferida para a composição do modelo (melhor t).

Os estudos iniciais indicaram que a classificação mais adequada para a variável Tipo de resíduo é a utilizada acima. A escala original testada utilizou os valores correspondentes a 0 (referência), 1 (contraforte), 2 (compensado) e 3 (casca de arroz). Porém, através de um ajuste empírico, foi constatado que os valores de 0 (referência); 1 (contraforte); 1,5 (compensado) e 3 (casca de arroz) se adequavam melhor ao modelo.

#### 4.7.2.1 Resultados do modelo de regressão

O modelo resultante (numérico – ver Excel) foi o seguinte Equação (14):

$$\text{NRC} = 0,34114 - 0,000165 * \text{Densidade} + 0,02936 * \text{Tipo de Resíduo} \quad (14)$$

Este modelo foi investigado de acordo com os procedimentos tradicionais em análise de Regressão, com bons resultados. Na análise de variância do Modelo da Equação (14), os testes estatísticos apresentaram o  $F_{\text{teste}}$  igual a 11,41. Considerando um nível de significância de 5%, o  $F_{\text{crítico}}$  é indicado como 4,10 e sendo  $F_{\text{teste}} > F_{\text{crítico}}$ , portanto rejeitou-se a hipótese nula de não haver regressão e pode-se concluir que o modelo de regressão é significativo.

A análise de significância das variáveis independentes, apresentadas através do teste t indicou que as variáveis Densidade e Tipo de Resíduos podem ser aceitas. A variável Tipo de Resíduo contém um  $t_{\text{teste}} = 2,24$  e a variável Densidade, um  $t_{\text{estatístico}} = -3,87$ , ambos superiores (em módulo) ao nível crítico ( $t_{\text{crítico}} = 2,23$ ), para o nível de 95% de significância. A variável Densidade possui  $t_{\text{teste}}$  superior, em módulo, à variável Tipo de Resíduo, indicando importância superior na explicação das variações de NRC. Além disso, o sinal negativo indica influência inversamente proporcional, ou seja, quanto menor a densidade, maior será o NRC.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi de 0,69542 demonstrando que cerca de 70% das variações do NRC são explicadas pelo modelo proposto. Os restantes 30% podem ser devidos a variáveis não mensuradas, como, por exemplo, teor de água para moldagem, ou erros aleatórios de medição.

Tendo em vista a análise estatística, pode-se concluir que o modelo da Equação (14) atende aos princípios da análise de regressão e atinge o nível de significância tradicional de 95%, podendo ser aceito como representante do experimento realizado.

#### **4.7.3 Considerações sobre a análise estatística**

Não foram encontrados na literatura trabalhos na área de acústica com antecedentes em análise estatística, tampouco empregando as técnicas de análise de variância (ANOVA) ou regressão para comprovação de seus resultados.

Neste trabalho investigou-se se existe diferença significativa entre as médias observadas (ANOVA) e como estas interagem com o NRC (regressão). Concluí-se que, através da técnica de análise de variância (ANOVA), o Tipo de resíduo e a Densidade Aparente dos CPs apresentaram diferença de médias com o NRC, com significância de 95%, ou seja, estas variáveis exercem influência significativa no comportamento do NRC. Já o teor de resíduo não apresentou interação significativa com o NRC, pois este deve ter interação com a demanda de água.

Através da regressão, foi criando um modelo estatístico, com o qual pode-se analisar o comportamento conjunto das variáveis independentes, como o Teor e o Tipo de resíduo empregado e a Densidade aparente dos CPs. Concluiu-se que o Tipo de resíduo e a Densidade aparente influenciaram no NRC, porém o Teor não, pois este não apresenta significância de 95% no teste t. O coeficiente de determinação demonstrou que cerca de 70% das variações do NRC foram explicadas pelo modelo apresentado.

Assim, a análise estatística confirma e reforça os resultados dos itens 4.2 a 4.5.

#### 4.8 ANÁLISE ECONÔMICA

Analisando os resultados dos coeficientes de absorção sonora dos compósitos produzidos neste trabalho, constata-se um desempenho satisfatório, com um potencial de absorção acústica interessante.

Uma análise da perspectiva comercial da nova argamassa com seus devidos resíduos se faz necessária para verificar a viabilidade econômica dos novos compósitos. A Tabela 22, apresenta um levantamento de preços dos materiais convencionais à venda no mercado (lã de vidro, lã de rocha e espuma acústica) e o custo da argamassa de referência. Para os resíduos incorporados foi considerado um valor relativo gasto com energia elétrica para a secagem, o corte e a trituração dos materiais. Considerou-se o teor de 50% de substituição para os três, indicando o limite máximo testado, com resultados mais animadores.

**Tabela 22: Levantamento de preços de materiais convencionais e dos compósitos estudados**

<b>Material Analisado</b>	<b>Custos/Valores em Reais</b>	<b>NRC*</b>
Lã de Vidro (25 mm)	17,00/ m <sup>2</sup> ou 680/m <sup>3</sup>	0,660
Espuma Acústica (20 mm)	22,50/m <sup>2</sup> ou 1125/m <sup>3</sup>	0,360
Argamassa de Referência	286,00/m <sup>3</sup>	0,034
Argamassa com Resíduo de Compensado a 50%	199,40/m <sup>3</sup>	0,128
Argamassa com Resíduo de Casca de Arroz a 50%	197,23/m <sup>3</sup>	0,147
Argamassa com Resíduo de Contraforte a 50%	199,14/m <sup>3</sup>	0,067

\*Média dos NRCs dos resíduos encontrados na Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15

Verifica-se que uma vantagem ao utilizar os compósitos é o menor custo. Evidentemente os materiais com resíduos não competem com os materiais tradicionais, mas podem ser uma opção para uma melhoria em relação às argamassas de revestimento, pois apresentam também coeficientes de absorção melhores que a argamassa tradicional, além de redução de custos com deposição final em aterros de inertes.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa se refere à absorção acústica de argamassas, enfatizando materiais convencionais e materiais inovadores, com a utilização de resíduos de madeira gerados pela construção civil, casca de arroz oriunda da agroindústria, e resíduos da indústria calçadista (contraforte), que foram adicionados à argamassa com o objetivo de testar a possibilidade de melhorar a absorção acústica.

A estratégia para investigação de materiais, com propriedades acústicas relativamente desconhecidas, foi realizada por meio de estudos de diferentes dosagens dos resíduos com o emprego do método do tubo de impedância, com a análise em compósitos de Ø 100mm, apresentando resultados satisfatórios. Essa metodologia proporcionou uma caracterização apropriada.

Devido à utilização do método do tubo de impedância, houve a viabilização da obtenção dos coeficientes de absorção acústica de várias amostras, com a utilização de corpos de prova de pequenas dimensões (diâmetro de Ø 100mm, espessura de 20mm), proporcionando testes com uma maior quantidade e variabilidade de materiais em estudo.

As densidades aparentes dos compósitos com resíduos apresentaram-se inferiores quando comparadas ao compósito de referência (0% de resíduo). Os CPs que apresentaram menor densidade aparente demonstraram maiores coeficientes de absorção sonora, como é o caso dos compósitos de compensado resinado e de casca de arroz.

Analisando-se o comportamento dos compósitos com os distintos resíduos, observou-se diferenças dos coeficientes de redução de ruído (NRC), destacando-se o compósito com adição de casca de arroz (0,147), seguido do compensado resinado (0,128) e por último do contraforte (0,067), dado este também comprovado através da análise estatística (ANOVA e Regressão). Os compósitos com resíduos apresentaram NRC superior em relação ao compósito de referência, o que indica um incremento na absorção acústica com a adição de resíduos na argamassa.

Nas condições de execução deste estudo, as resistências à tração, na flexão e à compressão testadas nos compósitos com dosagens de 50% de adição de resíduo apresentaram-se maiores nos CPs de contraforte, seguidas do compensado resinado e da casca de arroz.

Em relação à análise estatística por regressão, a variável “Densidade Aparente do CP” apresentou-se mais significativa, seguida pela variável “Tipo de resíduo”. Observou-se também que, quanto menor a densidade aparente, maior é o valor do NRC, portanto quanto mais resíduos forem incorporados à argamassa, potencialmente maior será a absorção acústica (nos limites investigados). Seguindo a análise de Regressão, a influência da casca de arroz chega a ser três vezes superior quando comparada ao desempenho de NRC dos compósitos com contraforte e duas vezes superior quando comparada com o compósito com compensado resinado.

Os resultados demonstraram que os compósitos com adição de resíduos apresentaram coeficientes de absorção superiores aos corpos de prova de referência, ocorrendo deste modo um aumento da capacidade de absorção acústica desses compósitos. Visto que os custos para incorporação destes resíduos é baixo, pode-se concluir que os objetivos foram atingidos.

Assim sendo, pode-se afirmar que o presente trabalho alcançou resultados satisfatórios na obtenção de compósitos com diferentes resíduos, os quais apresentaram características que os qualificam com um potencial de absorção sonora. Superior à argamassa de referência conclui-se que estes compósitos com resíduos podem ser uma boa opção para a utilização na construção civil.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros, propõem-se os seguintes:

- Investigação de outros teores de resíduos;
- Investigação de outros resíduos e de combinações de resíduos;
- Investigação de composições granulométricas diferentes;
- Investigação de elementos de maior dimensão (componentes);
- Realização de ensaios em câmara reverberante para análise do coeficiente de absorção em campo difuso;
- Investigação de outras propriedades, tais como trabalhabilidade e aspecto físico, rugosidade e durabilidade;
- Investigação do consumo de água e da variação de absorção em função do teor de porosidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA F., J.; REDONDO P., J.; RAMIS S., J.; Sanchís R., V. Características acústicas de configuraciones com napas. In: III Congresso Ibérico de Acústica e XXXIV Congresso Espanhol de Acústica TECNIAÚSTICA. **Anais...** 2003.

ALBA, J.; MARANT, V., AGUILERA., J. L.; Ramis, J. Criterios de selección de materiales acústicos absorbentes com técnicas basadas em tubo de KUNDT. In: VI Congresso Ibérico de Acústica e XXXVII Congresso Espanhol de Acústica TECNIAÚSTICA. **Anais...** 2006.

Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI). Disponível em: [www.abimci.com.br](http://www.abimci.com.br). Acesso em: maio, 2012.

Associação Brasileira das Indústrias Produtoras de Calçados (ABICALÇADOS). **Resenha Estatística da Indústria Calçadista 2009**. Disponível em: <http://www.abicalcados.com.br>. Acesso em: Janeiro de 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 12179** - Tratamento acústico em recintos fechados: Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1** - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-3** - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 3: Pisos internos. Rio de Janeiro, 2008b.

AKKERMAN, S. Barreiras Acústicas. **Revista Techne**, n.156, p. 25, mar. 2010.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

BERALDO, A. L.; TOJAL, J. H. V. Utilização de argamassa de cimento e casca de arroz em moradias populares. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, **Anais...** Foz do Iguaçu, Paraná, 2001.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BORGES, C. A. M; SABBATINI, F. H. O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - BT/PCC/515**. São Paulo: USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2008.

BOONEN, R.; SAS, P.; DESMET, W.; LAURIKS, W.; VERMEIR, G. Calibration of the two microphone transfer function method by determining the hard wall impedance at shifted reference sections. In: ISMA2008: International Conference on Noise and Vibration Engineering. **Proceedings...** Belgium, 2008.

BARJA, N. S.; RIERA, P. J. A.; PÉREZ, J. M. S.; SORIANO, J. R.; CALLEJA, M. S. Y.; GUARINOS, J. V. Absorción acústica para probetas de ‘pasta de cimento’ com adición de “posidonia oceânica” resultados preliminares. In: V Congresso Ibérico de Acústica e XXXVI Congresso Espanhol de Acústica TECNIAÚSTICA. **Anais...** 2005.

BRANCO, F. G.; GODINHO, L.; TAVARES, J. A. **Utilização de Argamassas Leves na Minimização da Transmissão de Ruídos de Impacto em Pavimentos**. Universidade de Coimbra, Portugal, 2010.

BRÜEL & KJAER. **Measuring Sound**. Denmark: K Larsen & Son, 1984.

CARVALHO, B. A. **Acústica Aplicada à Arquitetura**. Rio de Janeiro/RJ: Livraria Freitas Bastos, 1967.

CARVALHO, M. L. U. **Resíduos de poli (tereftalato de etileno) e de pneu na confecção de pisos flutuantes para o isolamento do ruído de impacto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica**. Brasília/DF: Thesaurus, 2006.

CARVALHO, R. P. Ruído de Impacto em Lajes de Pisos. **VibraneWS - O Portal da Acústica** Disponível em: [www.arch-tec.com.br](http://www.arch-tec.com.br) Acesso em: Fevereiro, 2011.

CATAI, R. E.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. Materiais, técnicas e processos para Isolamento Acústico. In: 17 CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006.

CÉSAR, F.; COSTA, M. L.; CUNHA, R. D. A. Identificação, Caracterização e Gestão de Resíduos de Madeira em Obras de Edificações em Salvador-BA. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Recife. **Anais ... UFBA**, 2009.

CHAMMA, C. V. P. **Produção de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico**. 2004. Tese (Doutorado em Agronomia). UNESP, Botucatu, São Paulo.

CHOY, Y. S.; HUANG, L. Measurement of in-duct acoustic properties by using a single microphone with fixed position. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 116, n. 6, p. 3498-3504, Dez. 2004

COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. The effect of casting pressure on the properties of wood fiber reinforced plaster. **Journal of Materials Science Letters**, v. 7, n. 9, p. 918-921. 1988

DACOSTA, L. P. E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; CALEGARI, L. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii Engelm*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005.

DOUTRES, O.; SALISSOU, Y.; ATALLA, N.; PANNETON, R. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 506–509. 2010

DUARTE, E. A.C.; VIVEIROS, E.B. Acoustic degradation of buildings along historical evolution of architecture: the construction of a timeline. In: Internacional Congresso n Acoustics, 18. Kyoto. **Proceedings...** Kyoto, 2004

DUARTE, E. A. C.; VIVEIROS, E. B. Desempenho acústico na arquitetura residencial brasileira: paredes de vedação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 159-171, jul./set. 2007.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1988.

EVALDT, D. C. **Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como co-produto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

ERSOY, S.; KÜÇÜK, H. Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Applied Acoustics*, v. 70, p. 215–220. 2009.

FARESIN, A. E.; MELO, E. F. R. Q. Diagnóstico dos resíduos da construção civil do município de Erechim, RS. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2009, Recife. **Anais...** Recife, 2009.

FERRAZ, R. **Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de múltiplos pavimentos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FERREIRA, R. de C.; GOBO, J. C. da C; CUNHA, A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiaria e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, no 1, p. 1-11, jan./mar. 2008.

FERREIRA, J.A.C.; ZANNIN, P.H.T. Determinação de coeficientes de isolamento acústico: medições in situ e simulação computacional. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 15-29, abr./jun. 2007.

FERREIRA NETO, M. F.; BERTOLI, S. R. Desempenho acústico de paredes de blocos e tijolos cerâmico: uma comparação entre Brasil e Portugal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 169-180, out./dez. 2010.

FERREIRA NETO, M. F; BERTOLI, S. R. Conforto acústico em edifícios residenciais. In: V Congresso Ibérico de Acústica e XXXIX Congresso Espanhol de Acústica TECNIAACÚSTICA. **Anais...** 2008.

FOLIENSTE, G. C. **Building Performance Baseada em I & D Resumo Roteiro**. In: PBB Estado Internacional da Arte: PeBBu 2 Internacional AOTA Relatório - Relatório Final, R. Becker, CIB, Rotterdam, Holanda. 2005.

FRIEDRICH, A. F. **Avaliação da contribuição do revestimento na isolação sonora de paredes de alvenaria**. 2010. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

GAZOLA, A. P. **Argamassas de assentamento e revestimento fabricadas com compósito de cimento madeira: serragem da madeira de *Pinus Taeda***. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão.

GERGES, S. Ruído: **Fundamentos e Controle**. 3ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.



GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

GONÇALVES, O. M.; JONH, V. M.; PICCHI, F. A; SATO, N. M. N. Normas Técnicas para Avaliação de Sistemas Construtivos Inovadores para Habitações. **Coletânea Habitare**, v. 3, p. 43-53, 2007.

GUIMARÃES, L. E.; TUBINO, R. M. C. Ambientação térmica de casas de madeira utilizando paredes externas duplas recheadas com argamassa contendo casca de arroz, resíduos de borracha (pneu) e garrafa pet triturada. In: Congresso de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável – ICTR 2004. **Anais...** 2004.

HACHMI, M.; CAMPBELL, A. G. **Wood-cement chemical relationships.** In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Session II: Raw Material Considerations. USA. VOL. I, 1989. p. 43-47

HARVEY, A. **Footwear materials and technology.** New Zeland: Leather and Shoe Research Association, 1992.

HAX, S. P. **Estudo do potencial dos resíduos de E.V.A. no isolamento de ruído de impacto nas edificações.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico**, 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: Abril, 2011.

ILLBRUCK. **Soluções Acústicas.** Disponível em: <http://www.illbruck.com.br>. Acesso em: Abril, 2011.

ISAR. **Lã de vidro- Isolamento Acústico.** São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.isar.com.br>. Acesso em: Abril, 2011.

International Standardization Organization (ISO). **ISO 10534-1: Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio.** Geneva, 1996.

\_\_\_\_\_. **ISO 10534-2: Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.** Geneva, 1998.

\_\_\_\_\_. **ISO 140-3: Acoustic. Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.** Geneva, 1998a.

\_\_\_\_\_. **ISO 140-4: Acoustic: Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms.** Geneva, 1998b.

\_\_\_\_\_. **ISO 140-5: Acoustic: Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound of façade elements and façades.** Geneva, 1998c.

\_\_\_\_\_. **ISO 140-7**: Acoustic: Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. Geneva, 1998c.

\_\_\_\_\_. **ISO 354**: Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room. Geneva, 2003.

\_\_\_\_\_. **ISO 717-1**: Acoustic: Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Geneva, 1996.

\_\_\_\_\_. **ISO 717-2**: Acoustics: rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part II: Impact sound insulation. Geneva, 1996. 12p.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA (IMAZON). Disponível em: <http://www.imazon.org.br>. Acesso em: 09 agosto de 2011.

ISOVER. **Guide L'acoustique du Bâtiment**, 2006. Disponível em: [http://www.isover.fr/var/isover/storage/synchronisation/doc/isover/ficheP/MDG\\_guideAcoustique.pdf](http://www.isover.fr/var/isover/storage/synchronisation/doc/isover/ficheP/MDG_guideAcoustique.pdf). Acesso em: Março 2011).

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68-74, jan./mar. 2008.

KAZMIERCZAK, C. S.; KERN, A. P.; SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M. V. V.; SILVA, H. C. Resíduos de contrafortes termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista. In: Vanderley Moacir John; Janaíde Cavalcante Rocha. (Org.). **Coletânea HABITARE**, Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003, v.1, p. 124-175.

KAZMIERCZAK, C. S.; KERN, A. P.; SANTOS, I. S. S.; SILVA, H. C.; RAMIRES, M. V. V. Alternativas para reciclagem de contrafortes na construção civil. **Técnicouro**, Novo Hamburgo, v. 20, n.1, p. 20-24, 2000.

KAZMIERCZAK, C. S.; SANTOS, I. S. S.; SILVA, H. C.; RAMIRES, M. V. V. ; KERN, A. P.; SILVA, Marcia Eloisa da . Biodeterioração de compósitos à base de gesso com adição de resíduos de contrafortes. In: VIII ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Modernidade e Sustentabilidade, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA/ANTAC, 2000d. v. II. p. 916-925.

KERN, A. P. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de contrafortes de calçados em matriz de gesso para uso como material de construção civil**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KERN, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; GREVEN, H. A.; SANTOS, I. S. S.; SILVA, H. C.; RAMIRES, M. V. V. Comportamento mecânico de compósitos à base de matriz de gesso com adição de resíduos de contraforte de calçados. In: VIII ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Modernidade e Sustentabilidade, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA/ANTAC, 2000a. v. II. p. 970-977.

KIELING, A. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz com pozolanas e material adsorvente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

KINO, N.; UENO, T. Investigation of sample size effects in impedance tube measurements. *Applied Acoustics*, v.68, p.1485–1493, 2007.

KRÜG, L. F. **Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

KRÜGER, E. L.; ZANNIN, P. H. T. Avaliação termoacústica de habitações populares na vila tecnológica de Curitiba. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 33-44, abr./jun. 2006.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus sp.* na produção de painéis de cimento madeira**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LOPES, R. K. **Relações e influências da aplicação da acústica no processo de projeto de arquitetura contemporânea**. 2010. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo.

LOSSO, M.; VIVEIROS, E. Gesso acartonado e isolamento acústico: teoria versus prática no Brasil. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo: **Anais... ANTAC**, 2004.

MAFRA, M. P. A.; SOEIRO, N.S.; ALVES, E.C.; SILVA, J.A.B. Determinação e análise comparativa dos coeficientes de absorção de painéis confeccionados a partir da fibra de coco e um painel de uso comercial. In: XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, SP. **Anais...** Ilha Solteira, SP: UNESP, 2005.

MAIA, M. A. L. **Contribuição ao mapeamento do ruído urbano na cidade de Porto Alegre - RS**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MASGALOS, R. **Análise de um Sistema de Dimensões Reduzidas para Ensaio de Isolamento a Sons de Percussão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civi), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

MASSARANI, P., ARAUJO, M. A. N. Implementação de medição em tubo de impedância com um método de função de transferência. In: VI Congresso Iberoamericano de Acustica. Buenos Aires, 2008. **Anais...** Buenos Aires, 2008

MATEUS, D.; PEREIRA, A.; SANTOS, P. Estudo da influência de pequenos defeitos de construção no desempenho acústico de pavimentos flutuantes. In: Acústica 2008. **Anais...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2008.

MATEUS, D; SANTOS, P. Previsão da transmissão marginal de sons de percussão entre compartimentos sobrepostos. In: Acústica, Coimbra, 2008. **Proceedings...** Coimbra, 2008.

MAYER, F. D.; CASTELLANELLI, C. A.; HOFFMANN, R. Geração de energia através da casca de arroz: uma análise ambiental. In: XXVII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia da Produção. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2007.

MELO, F. J. F. F. **Caracterização de argamassa modificada por partícula vegetal para nivelamento de contrapiso.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica.** 2008. Dissertação (Mestrado de Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo.

MITIDIARI FILHO, C. V. Desempenho Normalizado. **Téchne**, v.86, p.20-23. 2004.

MORI, F. A.; LOPES, Y. L. V.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F. Estudo da compatibilidade entre a madeira e as casas de Eucalyptus grandis e cimento portland. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 257-264, jul-set, 2007.

MOREIRA, K. M. C. Avaliação de propriedades fono-absorventes de materiais para painéis de revestimento. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). UFMG, Belo Horizonte.

MURGEL, E. **Fundamentos da acústica ambiental.** São Paulo: Senac, 2007.

MOSMANN, A. S. **Madeira utilizada em formas de estruturas de concreto: Proposta para a racionalização do uso e gestão dos resíduos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

NAVACERRADA, M. A.; DÍAZ, C.; PEDRERO, A.; GARCÍA, L. E. Absorción acústica de espumas de alumínio. **Materiales de Construcción**, v.58, n.291, p.85-98, 2008.

NEUBAUER, P. M. **Estudo comparativo entre diversas composições com pisos flutuantes de madeira natural-assoalho e tacos - quanto ao isolamento ao ruído de impacto.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

OLDHAM, D. J.; EGAN, C. A. The development of a broad band sound absorber using materials from the biomass. In: 8th European Conference on Noise Control 2009 (EURONOISE 2009). **Proceedings...** United Kingdom, 2009.

OLIVEIRA, M. C. R. **Compósito de poliuretano de mamona e resíduo industrial para isolamento térmica e absorção sonora.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

OLIVEIRA, E. C.; TEODORO, E. B. Método para medição do coeficiente de absorção sonora. In: 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Anais...** Uberlândia, Minas Gerais, 2005.

O'MALLEY, S. P. **Construction and testing of a modern acoustic impedance tube.** Dissertação (Mestrado). Monterey, CA: US Naval Postgraduate School, 2001.

PAULESKI, D. T. **Características de compósitos manufaturados com polietileno de alta densidade (PEAD) e diferentes proporções de casca de arroz e partículas de madeira.**

2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.

PAZ, G. S.; SANTOS, J. L. P. Uso da casca de arroz e po de pneu no isolamento do ruído de impacto. In: XX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 10, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** II Simposio Brasileiro de Metrologia em Acustica e Vibracoes. Rio de Janeiro: [SOBRAC], 2002, p. 1-6.

PEREYRON, D. **Estudo de tipologias de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

PFITSCHER, E. D. **Gestão e sustentabilidade através da contabilidade e controladoria ambiental: estudo de caso na cadeia produtiva de arroz ecológico**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). UFSC, Florianópolis.

PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas com polímeros e reforçadas com fibras vegetais**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

PRODI, N.; POMPOLI, F.; BONFIGLIO, P. A new apparatus for measuring the effective coupling of acoustic absorption of materials used inside cabins. **SAE Transactions**, v.114, n.6, p. 2617-2624, 2005.

POLLI, T.; VIVEIROS, E. B. Quando o preço não faz diferença: a relação entre custo do imóvel e conforto acústico. **Anais...** IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto: ANTAC, 2007.

PORKKA, J.; HUOVILA, P. **Conclusions and Recommendations on Decision Support Tools for Performance Based Building**. VTT Building and Transport Report. Finland, 2005.

PULSELLI, R. M.; SIMONCINI, F. M.; PULSELLI, S.B. Energy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em building indices to evaluate housing sustainability. In: Energy and Buildings, 2007, Italia. **Anais...** Department of Chemical and Biosystems Sciences, University of Siena, 2007.

RAMIS, J.; ALBA, J.; DEL REY, R.; ESCUDER, E.; SANCHÍS, V.J. Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de Kenaf. **Materiales de Construcción**, v.60, n.299, p.133-143, julio-septiembre 2010.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento portland**. 2. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

RICO, J. M. G.; RESTREPO-M., A.; GONZÁLEZ, C. A. Evaluación del desempeño acústico de paneles de raquis de plátano y banano. In: V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2009, Recife (ELECS 2009). **Anais...** Recife: ANTAC, 2009

ROCHA, J. C; JOHN, V. M. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre: Ed. ANTAC, 2003, **Coleção Habitare**, v. 4, p. 272.

RODRIGUES, M. V. **Marketing ambiental e sua influencia no comportamento de compras organizacionais: um estudo comparativo de casos na indústria calçadista paranaense**. 2009. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ROSSI, L. A.; CARDOSO, P. E. R.; BERALDO, A. L. Avaliação térmica de placas de argamassa de cimento e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.25, n.1, p.37-45, jan./abr. 2005

SALVO, R. V.; MAIRINK, M. T. F.; OLIVEIRA, E. C.; TEODORO, E. B. Construção de um tubo de impedância. In: 15o POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

SANCHÍS, E. J. **Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica**. 2008. Tese (Doutorado). Universidade Politècnica de Valencia, Valencia.

SANCHÍS RICO, V. J.; ALBA FERNÁNDEZ, J.; DEL REY TORMOS, R. Fabricación de nuevos materiales acústicos a partir de restos de botellas de plástico. In: VI Congresso Ibérico de Acústica e XXXX Congresso Espanhol de Acústica TECNIAACÚSTICA. **Anais...** 2009.

SCHIMID, A. L. **A idéia de Conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SEYBERT, A. R. D. Experimental determination of acoustic properties using a twomicrophone random-excitation technique. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.61, n.5, p.1362-1370, 1977.

SEYBERT, A. F. Notes on absorption and impedance measurements. In: Noise and Vibration Conference SAE. **Proceedings...** Traverse City, USA, 2003

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. F.; TEIXEIRA, D.E., BORTOLETTO, G.J. Produção de compósito madeira e casca de Eucalyptus urophylla S.T. Blake e cimento Portland. **Scientia Forestalis**. n. 68, p.59-67, ago. 2005.

SILVA, J.; GODINHO, L.; PEREIRA, A. Determinação experimental da absorção sonora de materiais utilizando amostras de dimensões reduzidas. In: Acústica 2008 - 20 - 22 de Outubro, Coimbra, Portugal. **Anais...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2008.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1971.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**. 5 ed. Belo Horizonte: EDTAL - Empresa Termo Acústica Ltda, 2005.

SOEIRO, N. S. **Desenvolvimento de painéis acústicos, confeccionados a partir de fibras de coco, para controle acústico de recintos**. Relatório final de pesquisa. Universidade Federal do Pará. 2004.

SOUZA, L. C. L. de.; ALMEIDA, M. G. de.; BRAGANÇA, L. **Bê-a-bá da acústica arquitetônica: Ouvindo a arquitetura**. Bauru, 2003. 150p.

SOUZA, R.; MITIDIERI FILHO, C. V. Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados à habitação popular. Conceituação e metodologia. In: Helene, P.R.L. (Ed). **Tecnologia de Edificações**, p.139-142. São Paulo: IPT, 1988.

THERIVEL, R; MORRIS, P. **Methods of Environmental Impact Assessment – Chapter 4: Noise**. London: UCL Press Limited, 1995.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unisinos, São Leopoldo.

TROIAN, A.; WERLE, A. P.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Resistência à penetração de íons cloreto em concreto com agregados reciclados de concretos. In: XIII Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 2010, Canela. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2010. v. 1. p. 1-12.

VIANNA, N. S.; ROMERO, M. A. Procedimentos metodológicos para a avaliação pós-ocupação em conjuntos habitacionais de baixa renda com ênfase no conforto ambiental. **Ambiente Construído**, v.2, n.3, p.71-84, jul./set., 2002.

WERLE, A. P.; TROIAN, A.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concreto com agregado reciclado de concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto: Novas tecnologias do concreto para o crescimento sustentável, 2010, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1. p. 1-12.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção de concreto**. 1997. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Efeito da adição de cinza de casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.28, n.2, p.217-226, abr./jun. 2008.

## APÊNDICES



## Apêndice A: Granulometria

Peneira (#) (mm)	Massa Retida (g)			Massa (%)	
	Amostra 01	Amostra 02	Média	Retida	Acumulada
<b>Areia</b>					
6,3	1,46	3,23	2,345	0	0
4,8	5,02	9,60	7,31	1	2
2,4	45,57	48,09	46,83	9	11
1,2	98,80	101,07	99,935	20	31
0,6	131,26	138,98	135,12	27	58
0,3	151,49	148,74	150,115	30	88
0,15	56,85	45,34	51,095	10	99
Fundo	9,55	4,95	7,25	1	100
<b>Compensado Resinado</b>					
6,3	0,58	0,5	0,54	0	0
4,8	0,59	0,85	0,72	0	1
2,4	61,24	62,94	62,09	25	25
1,2	129,56	125,41	127,485	51	76
0,6	39,21	38,98	39,095	16	92
0,3	12,36	13,08	12,72	5	97
0,15	3,82	4,85	4,335	2	99
Fundo	2,64	3,39	3,015	1	100
<b>Casca de Arroz</b>					
6,3	0	0	0	0	0
4,8	0,05	0,05	0,05	0	0
2,4	35,35	35,35	35,35	35	35
1,2	54,05	54,05	54,05	54	89
0,6	7,32	7,32	7,32	7	97
0,3	1,78	1,78	1,78	2	99
0,15	0,77	0,77	0,77	1	99
Fundo	0,68	0,68	0,68	1	100
<b>Contraforte</b>					
6,3	1,50	2,30	1,90	1	1
4,8	153,7	38,2	95,95	38	39
2,4	66,8	191,6	129,2	52	91
1,2	22,2	12,5	17,35	7	98
0,6	3,40	2,90	3,15	1	99
0,3	0,9	1	0,95	0	99
0,15	0,6	0,6	0,6	0	100
Fundo	0,9	0,9	0,9	0	100

**Apêndice B: Quantidade de materiais utilizado para confecção dos corpos de prova**

Material	Teor de Resíduo (%)	Cimento		Areia		Resíduo		Massa Total (g)
		(ml)	(g)	(ml)	(g)	(ml)	(g)	
Referência	0	300	283,75	1200	1948,00	0	0,00	2531,85
Compensado Resinado	5	300	294,16	1140	1833,00	60	13,23	2453,39
	10	300	297,90	1080	1743,80	120	26,32	2416,42
	25	300	287,30	900	1446,00	300	56,43	2143,13
	50	300	287,00	600	960,00	600	122,60	1738,20
Contraforte	5	300	289,04	1140	1833,90	60	13,78	2416,72
	10	300	294,30	1080	1646,80	120	25,56	2226,66
	25	300	289,90	900	1454,60	300	64,14	2093,64
	50	300	289,77	600	966,60	600	123,85	1975,22
Casca de Arroz	5	300	290,95	1140	1862,00	60	7,65	2443,90
	10	300	290,50	1080	1750,40	120	14,50	2345,40
	25	300	291,40	900	1450,40	300	35,01	2073,21
	50	300	290,24	600	340,00	600	69,11	1661,25

**Apêndice C: Coeficiente de absorção acústica do resíduo compensado resinado**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>
200	0,079339	0,069604	0,062895	0,047881	0,095308
<b>250</b>	0,056929	0,117213	0,059455	0,087734	0,098731
400	0,036663	0,096056	0,097298	0,081727	0,174793
<b>500</b>	0,034751	0,083189	0,028488	0,139447	0,271376
800	0,086023	0,052930	0,062546	0,219091	0,309554
<b>1000</b>	0,035285	0,063107	0,067877	0,168850	0,268020
1600	0,036488	0,112490	0,135827	0,236389	0,156442
<b>2000</b>	0,010291	0,061586	0,035229	0,313234	0,182766
NRC	0,034314	0,081274	0,047762	0,177316	0,205223

**Apêndice D: Coeficiente de absorção acústica do resíduo casca de arroz**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>
200	0,079339	0,051153	0,057148	0,0778	0,098520
<b>250</b>	0,056929	0,046030	0,051873	0,0383	0,077146
400	0,036663	0,033074	0,035417	0,1050	0,097620
<b>500</b>	0,034751	0,034441	0,030179	0,1533	0,116603
800	0,086023	0,029355	0,016947	0,0016	0,261345
<b>1000</b>	0,035285	0,032739	0,021138	0,0284	0,337734
1600	0,036488	0,017555	-0,005420	0,0388	0,294341
<b>2000</b>	0,010291	0,105119	0,521625	0,1856	0,571121
NRC	0,034314	0,054582	0,156204	0,1014	0,275651

**Apêndice E: Coeficiente de absorção acústica do resíduo contraforte de calçado**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>
200	0,079339	0,067797	0,160715	0,108287	0,057671
<b>250</b>	0,056929	0,055510	0,098491	0,130022	0,074070
400	0,036663	0,040347	0,100280	0,108007	0,067572
<b>500</b>	0,034751	0,041412	0,058741	0,037945	0,008677
800	0,086023	0,006428	0,010843	0,107048	0,039286
<b>1000</b>	0,035285	0,026827	0,039850	0,113883	0,037010
1600	0,036488	0,012628	0,020886	0,035382	0,030635
<b>2000</b>	0,010291	0,100685	0,091955	0,063789	0,089593
NRC	0,034314	0,056106	0,072259	0,086410	0,052338

**Apêndice F: Resultados de tração na flexão**

<b>CPs</b>	<b>Amostras</b>	<b>Força Prensa (N)</b>	<b>Flexão (MPa)</b>	<b>Média Verificação &lt;0,3</b>
<b>Referência</b>				
	CP 1	518	1,214063	0,264844
	CP 2	618	1,448438	0,030469
	CP 3	757	1,774219	-0,295310
		<b>Média</b>	<b>1,478906</b>	
<b>Madeira</b>				
50%	CP 1	428	1,003125	0,043750
	CP 2	480	1,125000	-0,078130
	CP 3	432	1,012500	0,034375
			<b>1,046875</b>	
<b>Contraforte</b>				
50%	CP 1	465	1,089844	0,125781
	CP 2	487	1,141406	0,074219
	CP 3	604	1,415625	-0,200000
			<b>1,215625</b>	
<b>Casca de arroz</b>				
50%	CP 1	358	0,839063	-0,08750
	CP 2	228	0,534375	0,21718
	CP 3	376	0,881250	-0,12969
			<b>0,751563</b>	

**Apêndice G: Resultados de tração na compressão**

<b>CPs</b>	<b>Amostras</b>	<b>Força Prensa (N)</b>	<b>Compressão A</b>	<b>Média Verificação &lt; 0,5</b>
<b>Referência</b>				
	CP 1a	7532	4,707500	-0,176350
	CP 1b	6458	4,036250	0,494896
	CP 2a	6794	4,246250	0,284896
	CP 2b	7011	4,381875	0,149271
	CP 3a	7869	4,918125	-0,386980
	CP 3b	7835	4,896875	-0,365730
			<b>4,531146</b>	
<b>Madeira</b>				
50%	CP 1a	3434	2,146250	0,040312
	CP 1b	3407	2,129375	0,057187
	CP 2a	3594	2,246250	-0,059690
	CP 2b	3308	2,067500	0,119063
	CP 3a	3410	2,131250	0,055312
	CP 3b	3838	2,398750	-0,212190
			<b>2,186563</b>	
<b>Contraforte</b>				
50%	CP 1a	5818	3,63625	0,006979
	CP 1b	5768	3,60500	0,038229
	CP 2a	5780	3,61250	0,030729
	CP 2b	5577	3,48562	0,157604
	CP 3a	5772	3,60750	0,035729
	CP 3b	6260	3,91250	-0,269270
			<b>3,643229</b>	
<b>Casca de arroz</b>				
50%	CP 1a	4122	2,576250	-0,582600
	CP 1b	2953	1,845625	0,148021
	CP 2a	3609	2,255625	-0,261980
	CP 2b	2903	1,814375	0,179271
	CP 3a	2610	1,631250	0,362396
	CP 3b	2942	1,838750	0,154896
			<b>1,993646</b>	

