



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

- MESTRADO-

**DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA EM
PLACAS FABRICADAS COM RESÍDUOS DE E.V.A.**

Por

Francisco Pereira da Silva Júnior

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do
grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março – 2007



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA
- MESTRADO -

**DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA EM
PLACAS FABRICADAS COM RESÍDUOS DE E.V.A.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Francisco Pereira da Silva Júnior

Orientador: Professor Ph.D. Roberto Leal Pimentel

Co-orientador: Professor Dr. Ângelo Vieira Mendonça

João Pessoa – Paraíba

Março de 2007

S586d Silva Júnior, Francisco Pereira da
Determinação de coeficiente de absorção acústica em
placas fabricadas com resíduos de E.V.A./ Francisco
Pereira da Silva Júnior - João Pessoa, 2007.
114 fl. il.:

Orientação: Roberto Leal Pimentel
Coorientação: Ângelo Vieira Mendonça
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Resíduo. 2. Acústica. 3. Absorção. 4.
Reaproveitamento. 5. Compósito. I. Pimentel, Roberto
Leal. II. Título

UFPB/BC

CDU:

**DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA
EM PLACAS FABRICADAS COM RESÍDUOS DE E.V.A.**

Por

Francisco Pereira da Silva Júnior

Dissertação aprovada em 30 de março de 2007

Período Letivo: 2007.1


Prof. PhD ROBERTO LEAL PIMENTEL – UFPB
Orientador


Prof. Dr. ÂNGELO VIEIRA MEDONÇA - UFPB
Co-orientador


Prof. Dr. ALUÍSIO BRAZ DE MELO - UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. ANTONIO FARIAS LEAL – UFGO
Examinador Externo

**João Pessoa-PB
2007**

“Tudo posso em Cristo que me fortalece”
[Filipenses 4, 13]

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi uma realização pessoal, porém uma árdua conquista tanto no aspecto técnico, quanto no aspecto emocional. A superação de obstáculos foi essencial e o apoio de inúmeras pessoas a quem devo prestar meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, ao professor Roberto Pimentel, meu orientador, pelo exemplo como profissional, pelo auxílio na escolha de um tema que considero de grande relevância. Ao meu coorientador, professor Ângelo Vieira, pelos seus ensinamentos e humildade.

Aos amigos Antônio Sobrinho e Cícero da Rocha, pelos auxílios técnicos neste trabalho, bem como ao apoio motivacional.

Ao aluno de iniciação científica, Arnaldo Almeida, pelo seu auxílio, companheirismo e dedicação ao trabalho desenvolvido.

Ao Coordenador do LABEME, Prof. Normando Perazzo, aos funcionários, Zito, Delby, Gato, Rodrigo e Milson que prestaram grande auxílio na calibração da câmara reverberante. Ao Diretor do Centro de Tecnologia que cedeu as instalações do laboratório de hidráulica para realização dos experimentos. Estendo meus agradecimentos aqueles que somaram indiretamente para essa conquista, seja contribuindo na minha formação ou com um bom convívio.

À minha esposa Alessandra Cavalcanti, minhas filhas Catharine e Ana Beatriz, que mesmo em sua tenra idade soube compreender a ausência de seu pai em alguns momentos do convívio familiar.

Agradeço aos meus pais por minha formação como pessoa, tornando uma pessoa em busca de conhecimentos e de valores. Agradeço também pelo carinho e atenção me tornando uma pessoa feliz.

A todos os membros da minha família pelos bons momentos de convívio, pelo apoio e pela união.

Agradeço ainda aos amigos e colegas de turma pelos bons momentos compartilhados e pela parceria em momentos bons e difíceis.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se a propriedades de compósitos de matriz cimentícia, utilizando o resíduo de Etileno Acetato de Vinila (EVA) como agregado, com vistas ao seu emprego como material absorvente acústico, na forma de placas. Em particular, foi investigado o efeito da porosidade e resistividade ao fluxo de ar na capacidade de absorção acústica da placa confeccionada. O método utilizado para a determinação do coeficiente de absorção acústica das placas foi por meio de ensaio em câmara reverberante, compondo como um dos objetivos do presente trabalho a montagem e calibração da referida câmara reverberante. A metodologia aplicada visava caracterizar a relação entre granulometria, índice de vazios, resistividade ao fluxo de ar e a capacidade de absorção acústica de placas confeccionadas com o resíduo em estudo, além de definir os protótipos a serem ensaiados em câmara reverberante. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de substituição de materiais industrializados pelos compostos produzidos de cimento e resíduo de EVA em faixas de frequências acima de 1kHz.

PALAVRAS CHAVE: Resíduos, acústica, absorção, reaproveitamento, compósitos.

ABSTRACT

In this work, the properties of cementitious matrix composites were studied, using the *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) residue as an aggregate, with a view to its use as acoustic absorbent material, in the form of plates. In particular, the effect of porosity and resistivity on the air flow in the acoustic absorption capacity of the prepared plate was investigated. The method used to determine the acoustic absorption coefficient of the plates was by means of a reverberant chamber test, one of the objectives of the present work being to assemble and calibrate such reverberant chamber. The applied methodology was aimed at characterizing the relationship between granulometry, void index, resistivity to the air flow and the acoustic absorption capacity of plates made with the residue under study, besides defining the prototypes to be tested in reverberant chamber. The results indicated the possibility of replacing industrialized materials with the compounds produced from cement and EVA residue in frequency bands above 1 kHz.

KEY WORDS: Residue, acoustic absorption, composites, reuse.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVOS	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Medição do som e o nível de pressão sonora.....	17
2.2. Tempo de reverberação e coeficiente de absorção sonora.....	21
3. GERAÇÃO DE RESÍDUO DE EVA E A PRODUÇÃO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM RESÍDUO DE EVA.....	30
3.1. Produção do resíduo de EVA.....	31
3.2. Processo produtivo placas expandidas de EVA.....	32
3.3. Produção de agregado artificial de EVA.....	36
4. O RESÍDUO DE EVA COMO MATERIAL ABSORVENTE ACÚSTICO	39
4.1. Espessura das placas	41
5. MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA EM CÂMARA REVERBERANTE.....	43
5.1. Características gerais do método de medição e definições	43
5.2. Amostra de ensaio.....	47
5.3. Condições ambientais	48
5.4. Princípio de medição e método de cálculo.....	48
5.4.1. Formulação de Sabine.....	49
5.5. Medição do tempo de reverberação	53
5.5.1. Número de posições do microfone e da fonte sonora, e de curvas de decaimento	53
5.5.2. Método da interrupção de ruído	54
5.5.3. Avaliação das curvas de decaimento	56
5.6. Difusidade do campo sonoro na câmara reverberante	57
5.6.1. Dispositivos utilizados para atingir um grau de difusão sonora adequado	58
5.7. Critérios da norma ISO 354	59
6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	60
6.1. Confecção dos protótipos.....	60
6.1.1. Materiais utilizados.....	63
6.1.2. Preparação dos compósitos leves.....	65
6.2. Parâmetros investigados nas placas	70
6.2.1. Índice de vazios.....	70
6.2.2. Resistividade ao fluxo de ar	72
6.2.3. Determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.....	78
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
7.1. Estudo dos parâmetros intervenientes no coeficiente de absorção sonora	97
7.1.1. Índice de vazios.....	97
7.1.2. Resistividade ao fluxo de ar	99
7.1.3. Calibração da câmara reverberante	101
7.1.4. Coeficiente de absorção sonora dos protótipos ensaiados em câmara reverberante.....	105
8. CONCLUSÕES.....	110
8.1. Sugestões para futuros trabalhos.....	111
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da parcela de mercado de exportação de calçado do Estado da Paraíba	31
Figura 2 – Resíduo em forma de Pó	34
Figura 3– Resíduo em forma de aparas	34
Figura 4 - Etapa do processo de reciclagem de sobras em forma de aparas.....	35
Figura 5 - Resíduos da indústria de calçados, ensacados e armazenados em galpões	35
Figura 6 – Detalhe das malhas das peneiras e do agregado artificial de EVA	37
Figura 7 – Moinho granulador.....	37
Figura 8 - Esquema de montagem dos forros	40
Figura 9 – Forro em lã de rocha envolta em sacos plásticos preto sobre estrutura de grades em madeira utilizada no Aeroporto Internacional dos Guararapes – Recife/PE	40
Figura 10 – Comparação da variação da amplitude de velocidade para altas e baixas frequências superposta sobre uma seção de material poroso e substrato	41
Figura 11 - Planta baixa laboratório reverberante da UFPB (câmara reverberante), sem escala.....	45
Figura 12 - Corte esquemático laboratório reverberante	46
Figura 13 – Área disponível para posicionamento das amostras a serem ensaiadas	47
Figura 14 - Vista superior e corte da fôrma dos protótipos (sem escala), medidas em centímetros.....	61
Figura 15 - Esquema de montagem dos moldes dos protótipos (sem escala)	62
Figura 16 - Massa unitária no estado solto do agregado de EVA	64
Figura 17 - Curva granulométrica dos agregados de EVA.....	65
Figura 18 - Detalhe do recipiente utilizado na pré-molhagem do agregado de EVA	65
Figura 19 - Colocação do agregado de EVA no misturador.....	66
Figura 20 - Pré-mistura do agregado e 1/2 do aglomerante	67
Figura 21- Adição do 1/3 restante de água	67
Figura 22 - Argamassa pronta para moldagem dos compósitos.....	67
Figura 23 - Molde após aplicação de aditivo desmoldante	68
Figura 24 - Colocação da argamassa sobre o molde	69
Figura 25 - Placas moldadas	69
Figura 26 - Processo de desmoldagem	69
Figura 27 – Desenho esquemático dos pontos de medição de velocidade do fluxo e respectivas áreas de influência (medidas em centímetros).....	75
Figura 28 - Equipamentos utilizados na medição do fluxo de ar	76
Figura 29 - Amostra instalada e pronta para medição do fluxo de ar.....	76
Figura 30 - Esquema de montagem da amostra no túnel de vento utilizado para medição do fluxo de ar	77
Figura 31 - Disposição da amostra de placas de compostas de cimento e EVA na câmara reverberante	79
Figura 32 - Disposição da amostra de SONIQUE CLASSIC 50C na câmara reverberante	79
Figura 33 - Posição da fonte sonora e microfone no interior da câmara reverberante	81
Figura 34 - Esquema de ligação dos equipamentos utilizados na câmara reverberante (Adaptado Brüel & Kjaer, 2003)	82
Figura 35 - Ciclo de medição típica do tempo de reverberação para o método do ruído interrompido (Adaptado de Brüel e Kjaer, 2003).....	83
Figura 36 - Esquema e definições utilizadas no cálculo do tempo de reverberação	84

Figura 37 - – Planta esquemática dos difusores estáticos nas dimensões 1,20 x 1,00m (medidas em metros).....	86
Figura 38 - Planta esquemática dos difusores estáticos nas dimensões 1,40 x 1,00m (medidas em metros).....	87
Figura 39 - Planta difusores estáticos nas dimensões 2,00 x 1,20m (medidas em metros).....	88
Figura 40 - Aparelho de medição de condições climatológicas	89
Figura 41 - Montagem da amostra de referência no interior da câmara.....	90
Figura 42 - Detalhe borda da amostra protegida com material reflexivo (alumínio).....	90
Figura 43 - Câmara contendo amostra de referência e sem difusores	91
Figura 44 - Câmara contendo amostra de referência e sem difusores	91
Figura 45 - Instalação de difusores estáticos	92
Figura 46 - câmara contendo pequena quantidade de difusores – 5,0 m ²	92
Figura 47 - Câmara com 20 m ² de difusores instalados vista lateral em relação a porta	93
Figura 48 - Câmara com 20 m ² de difusores instalados vista frontal em relação a porta.....	93
Figura 49 - Montagem amostra traço 1:3,4 (cimento:EVA) na câmara reverberante	94
Figura 50 - Detalhe montagem da amostra traço 1:3,4 (cimento:EVA) na câmara reverberante	94
Figura 51 - Detalhe da borda da amostra no traço 1:3,4 (cimento:EVA) protegida com material reflexivo (alumínio).....	95
Figura 52 - Montagem amostra traço 1:1,7 (cimento:EVA) na câmara reverberante	95
Figura 53 - Detalhe da borda da amostra no traço 1:1,7 (cimento:EVA) protegida com material reflexivo (alumínio).....	96
Figura 54 - Índice de vazios das amostras nos traços 1:1,7 e 1:2,0 sem correção granulométrica, e 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica	98
Figura 55 – Instalação da amostra no túnel de vento com fluxo direcionado por canal prismático	99
Figura 56 - Coeficiente de absorção sonora obtidos a partir da resistividade ao fluxo de ar	101
Figura 57 – Coeficiente de absorção sonora da amostra de referência em função da área de difusores estáticos instalados no interior da câmara	103
Figura 58 - Coeficiente de absorção sonora do material absorvente de referência nas faixas de 125 a 8000 Hz em função da área de difusores instalados	104
Figura 59 - Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara vazia com 20 m ² de difusores instalados.....	105
Figura 60 – Coeficiente de absorção sonora das amostras traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica	106
Figura 61 – Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara com amostra 1:1,7 com correção granulométrica	107
Figura 62 - Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara com amostra 1:3,4 com correção granulométrica	107
Figura 63 - Comparativo entre materiais industrializados e amostra traço 1:3,4 c/ correção granulométrica	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Ponderação A e C discriminados em frequência	19
Tabela 2 – “Adição” de decibéis.	19
Tabela 3 – Limites máximos de nível de ruído permitido por diferentes legislações	20
Tabela 4 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente	21
Tabela 5 – Coeficiente de absorção acústica	29
Tabela 6 – Parcela de mercado de alguns Estados exportadores de calçados	30
Tabela 7 – Malhas das peneiras com respectivas dimensões máximas dos agregados obtidos e produção	37
Tabela 8 - Características gerais da câmara reverberante da UFPB	44
Tabela 9 – Área de absorção sonora equivalente máxima para câmara de volume $V=200m^3$	47
Tabela 10 – Temperatura e umidade relativa do ar durante realização dos ensaios.....	48
Tabela 11 – Área de influência dos pontos de medição da velocidade do fluxo de ar e área total da amostra	75
Tabela 12 - Índice de vazios traço 1:1,7 e 1:2,0 (cimento:EVA) sem correção granulométrica	97
Tabela 13 – Índice de vazios traço 1:1,7 e 1:3,4 (cimento:EVA) com correção granulométrica	97
Tabela 14 – Resultados do ensaio de resistividade ao fluxo de ar das amostras	100
Tabela 15 - Tempo de reverberação relativos ao ensaio de calibração da câmara reverberante	102
Tabela 16 – Coeficiente de absorção sonora para amostra de referência em relação a área de difusores instalados	102
Tabela 17 – Área de absorção equivalente da câmara reverberante da UFPB	104
Tabela 18 – Tempo de reverberação de referência e com amostras nos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica	106
Tabela 19 – Coeficiente de absorção sonora das amostras nos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica	106
Tabela 20 – Discriminação e composições de materiais acústicos industrializados	108

1. INTRODUÇÃO

A poluição sonora é hoje, segundo a Organização Mundial da Saúde – O.M.S. – o tipo de poluição que atinge o maior número de pessoas no mundo, depois da poluição do ar proveniente de emissões gasosas e da poluição da água (FERREIRA, 2004).

No período pós-revolução industrial, as pessoas passaram a conviver em ambientes extremamente ruidosos. Porém é, de certo modo, estranho afirmar que a sociedade seja a fonte geradora desta perturbação ambiental, induzida pela cultura do progresso por meio das máquinas. Nos centros urbanos, dentre outros fatores o transporte rodoviário apresenta-se como grande causador da poluição sonora e, conseqüentemente, do desconforto acústico coletivo.

Os elevados níveis de ruídos são problemas comuns em todas as regiões do mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, mais de trinta milhões de trabalhadores são expostos a ruídos perigosos (NIOSH, 1998 *apud* CONCHA-BARRIENTOS *et al.*, 2004). Na Alemanha, entre 4 e 5 milhões de pessoas (12-15% da força de trabalho) são expostas a níveis de ruídos definidos como perigosos pela O.M.S. (O.M.S., 2001 *apud* CONCHA-BARRIENTOS *et al.*, 2004).

CONCHA-BARRIENTOS (2004) apresenta em seu estudo que a exposição demasiada a níveis elevados de ruídos acarreta diversas patologias, entre estas: isolamento social, ansiedade, irritabilidade, hipertensão, baixa produtividade no trabalho, entre outras. Em casos de exposição prolongada e contínua ao ruído o indivíduo pode ser acometido por patologias irreversíveis, com o comprometimento do sistema auricular.

No caso do Brasil, não raro são encontradas cidades que tiveram uma ocupação urbana sem um prévio planejamento, principalmente as fundadas no período colonial, de modo que vias de tráfego veicular foram dispostas para utilização de veículos de tração animal, sendo as mesmas estreitas e próximas as residências, tornando-se nos dias atuais inadequadas para utilização por meio de veículos motorizados, degradando a qualidade de vida da população vizinha a essas vias. Com o crescimento das cidades, foram necessárias vias com maior capacidade de fluxo e conseqüentemente um aumento na emissão dos níveis de ruído. Em atividades educacionais, ambientes hospitalares e outros, os níveis de ruído ambiental são de grande importância.

As fontes de ruído no ambiente urbano não estão restritas apenas a ruído proveniente do tráfego de veículos, estando sujeito ainda a diversas outras fontes de ruídos de procedências as mais variadas possíveis, a exemplo dos ruídos gerados pela construção de edificações, atividades fabris, entre outras. Tais ruídos afetam as pessoas tanto ao ar livre quanto no interior das edificações. Na atualidade observa-se que as pessoas permanecem a maior parte do tempo diário no interior de edificações, sendo assim de extrema importância que estes ambientes sejam adequados, do ponto de vista acústico, reduzindo-se assim situações de desconforto ou mesmo prejudiciais à saúde.

Dois aspectos devem ser observados no que diz respeito à adequação acústica de um ambiente e que estão diretamente relacionados ao emprego de materiais com propriedades acústicas: o isolamento acústico, de modo a diminuir a níveis aceitáveis a entrada de ruído externo ao ambiente; absorção acústica dos materiais empregados nos ambientes, cujas propriedades influem para que o mesmo se torne acusticamente adequado à finalidade ao qual se destina.

Estes aspectos são objetos de estudos em extensa bibliografia sobre acústica de ambientes tais como BERANEK, 1971; KINSLER *et al.*, 1982; EVEREST, 2001, dentre outros. Parâmetros gerais para adequação acústica de ambientes a exemplo do tempo de reverberação, e específicos dos materiais como os coeficientes de absorção acústica e de isolamento acústico são extensamente discutidos nestas referências.

Os materiais com propriedades acústicas disponíveis comercialmente têm custos, em geral, elevados, fazendo desta forma que os projetos de adequação acústica de ambientes se tornem economicamente onerosos. Diante deste panorama surge então o interesse de estudar materiais não convencionais como absorventes acústicos nos ambientes urbanos.

O reaproveitamento de um dado tipo de resíduo por outros setores da economia tem sido, nos últimos anos, temas de importantes pesquisas. A construção civil é um dos setores com maior potencial para absorver os resíduos industriais. Concorrem para isto a necessidade de redução do custo da construção, a grande quantidade de matéria-prima e a diversidade de materiais empregados na produção, ampliando as opções de uso de resíduos com diferentes funções na edificação.

Do ponto de vista regional pode-se observar que ultimamente a geração de resíduos no setor calçadista, especialmente de resíduos de Etileno Acetato de Vinila (EVA – *Ethylene Vinyl Acetate*), tem aumentado bastante, sobretudo no estado da Paraíba, e isso tem sido

proporcional ao crescimento econômico do setor na região. Segundo POLARI FILHO *et al.* (2003), esse tipo de resíduo (EVA) possui baixa massa específica, tem boas características acústicas e térmicas, é inerte, não suscetível a fungos e pode ser aproveitado como agregado sintético para elaboração de compósitos leves. Entre as aplicações e vantagens possíveis dos compósitos leves na construção civil podem ser citadas: enchimento para lajes rebaixadas, isolamento acústico entre pavimentos, blocos e/ou painéis para vedação com redução da carga estrutural, isolamento térmico nas lajes de forro, etc. Essas características evidenciam a grande potencialidade desse resíduo para uso em diversos componentes e sistemas na construção civil, sem função estrutural.

Segundo GERGES (1992), os materiais de alta absorção acústica são, em geral, porosos e/ou fibrosos. Nos materiais porosos a energia acústica incidente entra pelos poros dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica. Esse autor afirma ser essencial que o material admita a passagem de um fluxo de ar, o que terá como consequência a possibilidade da propagação de ondas acústicas pelo ar dos poros ou interstícios do material.

Uma forma de determinar a influência da passagem de ar é proposta por GERGES (1992). A mesma é determinada através da resistividade ao fluxo de ar que atravessa a amostra.

O procedimento para medição da resistividade de fluxo em laboratório é normalizado pela NBR 8517 da ABNT, sendo esse procedimento adaptado de modo a determinar tal parâmetro para as amostras produzidas que serão descritas em capítulos posteriores.

Outro importante parâmetro envolvido na absorção acústica do material refere-se à porosidade do mesmo, sendo esse tratado no presente trabalho de forma aproximada através do índice de vazios das placas produzidas para funcionar como material absorvente acústico. Essa aproximação se deve ao fato das definições desses parâmetros serem um tanto quanto equivalentes, pois a porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios dos poros da amostra do material em relação ao volume total da mesma, enquanto que o índice de vazios é definido como sendo a razão entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Segundo GERGES (1992), os materiais de boa absorção acústica têm porosidade variando de 85 a 95%.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar as propriedades de absorção acústicas de placas produzidas a partir de EVA, gerados na região de estudo, de maneira que se possa agregar valor a esses materiais, como também contribuir para reduzir a deposição destes materiais em aterros.

Especificamente, os objetivos deste trabalho são:

- i. Relacionar os resíduos de calçados de EVA disponíveis na região de estudo, com potencial aplicação como absorvente acústico;
- ii. Selecionar matriz cimentícia formada com agregado oriundo de resíduo de EVA;
- iii. Desenvolver protótipo de placa para ser usado como absorvedor acústico;
- iv. Proceder à caracterização e propriedades acústicas destes materiais de modo a se obter os coeficientes de absorção sonora dos mesmos;
- v. Realizar estudo comparativo entre as placas produzidas com resíduo de EVA e os materiais comercialmente produzidos para absorção acústica no que se refere à capacidade de absorção sonora;
- vi. Estudo de parâmetros intervenientes no coeficiente de absorção sonora;
- vii. Calibração da câmara reverberante da Universidade Federal da Paraíba.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo SILVA (1971), o som pode ser definido de duas maneiras, fisicamente, é a vibração mecânica ou movimento oscilatório de um meio elástico gasoso, líquido ou sólido, através do qual energia é transferida para fora da fonte mediante ondas sonoras progressivas; genericamente pode ser definido como uma variação de pressão que gera uma excitação do mecanismo auditivo, resultando na percepção do som. O parâmetro utilizado para quantificar essa variação é a frequência, medida em ciclos por segundo (Hertz).

O sistema auditivo em humanos é capaz de perceber sons limites de frequências de 20 a 20.000 ciclos por segundo. Os sons com frequência abaixo de 20Hz são chamados de infrassons, enquanto que os acima de 20.000Hz são ditos ultrassons. Ambos os sons não são captados pelo ouvido humano, porém para outros seres vivos a faixa dita é audível, ou seja, que são captadas pelo sistema auditivo.

Observa-se um amplo espectro de faixa de frequência, devido a este fato a faixa de frequência audível aos seres humanos situa-se àquela compreendida entre 20 e 20.000Hz, sendo a mesma dividida em seções chamadas bandas de oitava, cujo nome advém do fato de que uma oitava corresponde a oito notas da escala musical. Uma oitava é uma faixa de frequência em que a maior frequência é o dobro da menor frequência, ou seja, uma oitava é uma razão 2:1 entre duas frequências. Cada banda de oitava é identificada pela frequência central. Para as bandas de oitava padrão, estas frequências centrais são: 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000Hz.

No que diz respeito à pressão sonora, o ouvido humano é capaz de perceber variações de pressões que variam de 20 μ Pa a 20Pa.

De acordo com SILVA (1971), define-se como ruído ou poluição sonora qualquer som indesejável que atinja níveis não aceitáveis e possa afetar, de forma negativa, a saúde e o bem-estar de um indivíduo ou de uma população. O ruído, além de gerar desconforto ao ser humano, pode prejudicar diretamente o aparelho auditivo, provocando a perda ou a diminuição gradual da audição, podendo, ainda, atuar sobre outros órgãos do corpo humano, perturbando as funções neurovegetativas com implicações no funcionamento orgânico, causando alteração da pressão arterial, náuseas, cefaleia, vômitos, perda de equilíbrio, perda de concentração, aumento do nível de estresse, inquietude, irritabilidade, entre outras.

2.1. Medição do som e o nível de pressão sonora

A medição do som tem caráter fundamental aos estudos de acústica, a necessidade desta medição permite avaliar e descrever o som. Estas medidas permitem a construção de ambientes sonoros mais agradáveis, de acordo com a necessidade do usuário do ambiente, por exemplo, os níveis sonoros exigidos em um concerto musical são completamente diferentes de um ambiente de um escritório. O uso do local é que vai determinar os níveis aceitáveis de pressão sonora.

O som pode ser medido através do nível de pressão sonora (NPS), expresso em decibéis (dB). Decibéis não são unidades como centímetros ou kilogramas, no sentido de que não estão linearmente relacionados a uma grandeza específica. Na realidade, decibéis expressam a razão logarítmica entre a potência ou intensidade sonora e uma potência ou intensidade de referência. Potência e intensidade sonoras não são fáceis de medir. Porém, a pressão sonora é facilmente medida com um medidor de nível sonoro. A pressão sonora pode também ser expressa em dB já que o quadrado da pressão sonora é proporcional à potência ou intensidade sonora. Utiliza-se o dB no lugar da amplitude real do som em unidades de pressão, porque o seu valor logarítmico é compatível com a forma como o ouvido humano interpreta o som, e porque os números são mais facilmente manipuláveis nos cálculos. No caso de medições de nível sonoro a pressão de referência corresponde a $20\mu\text{Pa}$ que é definido como 0dB e fora definido assim porque este valor corresponde ao limiar da audição. O cálculo do NPS é dado pela seguinte equação:

$$\text{NPS} = 20 \log \frac{P_m}{P_0} \quad [1]$$

Onde:

P_m – Pressão sonora medida;

P_0 – Pressão sonora de referência ($20\mu\text{Pa}$)

Um medidor simples de nível sonoro combina os níveis de pressão sonora em todas as frequências fornecendo o NPS global, em dB. Os medidores de NPS mais complexos possuem filtros que permitem medições em cada banda de oitava ou em bandas de um terço de oitava separadamente, podendo assim identificar o espectro do som medido.

Para MATTOS (2004), *Loudness*¹ é o volume do som como é percebido subjetivamente pelas pessoas. A potência acústica pode aumentar de 1,26 vezes (1dB, ou 26%), porém para o ouvido humano o volume permanece o mesmo. Pode aumentar 10 vezes (10dB, ou 900%), mas o ouvido acha que o volume apenas dobrou. Ou ainda, a Intensidade pode ser de 60 dB (nível de uma conversação normal), mas a 20 Hz o ouvido não percebe nada (volume zero), pois é surdo para essa intensidade nessa frequência.

A questão básica a se enfrentar, em relação à medição do som, é a seguinte: a parte sensível do medidor de nível de pressão sonora é o microfone, este reage igualmente a todas as faixas de frequências que compõem um som, por outro lado, nosso ouvido reage diferente para cada frequência. A saída é utilizar correções que variam com as frequências. Visto que a intensidade do som também influencia nossa percepção, tradicionalmente usamos três escalas de dB (decibel) corrigidos, chamadas curvas de ponderação os quais podemos citar as curvas A, B e C.

A função das curvas de ponderação é atribuir pesos maiores às frequências mais audíveis e pesos menores às menos audíveis, resultando numa média ponderada do nível de pressão sonora nas diversas faixas de frequência, em uma tentativa de aproximar-se da realidade do ouvido humano. A ponderação-A reduz o nível do som em baixas frequências para simular as variações da sensibilidade do ouvido em frequências distintas. Os valores da ponderação-A são indicados como dB(A) para diferenciá-los dos níveis não ponderados em dB. Similarmente, valores da ponderação-C são indicados como dB(C). A ponderação-C reduz ligeiramente o nível sonoro abaixo de 50 e acima de 5000 Hz, mas é quase uniforme na região central deste intervalo, podendo ser usada para aproximar uma leitura não ponderada, em dB, do medidor de nível sonoro que oferece apenas ponderações A ou C. A comparação dos níveis de ponderação A e C para uma dada fonte sonora, pode fornecer uma estimativa aproximada da distribuição de frequências. Se os dois níveis estiverem próximos em 1 ou 2 dB, a maior parte do ruído está acima de 500 Hz. Se os dois níveis variarem mais que alguns dB, uma parcela significativa do ruído está nas baixas frequências. Para converter os níveis de pressão sonora não ponderados de banda de oitava em níveis ponderados A ou C, adicione ou subtraia os valores indicados na Tabela 1 das bandas de frequência correspondentes. Em seguida, some (logaritmicamente) os níveis das bandas de oitavas (dois de cada vez) para obter o valor global em dB(A) ou dB(C). A combinação de dois valores em decibéis requer

¹ O termo pode ser substituído por Audibilidade que é o estudo de como nosso ouvido recebe e interpreta as flutuações da pressão sonora associada a variações de frequência.

que sejam convertidos para pressão ao quadrado, somados e convertidos novamente para decibéis, entretanto os cálculos podem ser aproximados usando-se a Tabela 2.

Tabela 1 – Valores de Ponderação A e C discriminados em frequência

Freqüências centrais das bandas de oitavas (Hz)									
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ponderação-A	-40	-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1
Ponderação-C	-2	0	0	0	0	0	0	0	-3

Fonte: Acústica e Vibrações (2002)

Tabela 2 – “Adição” de decibéis.

Diferença entre dois valores em decibéis	Quantidade a ser adicionada ao maior valor
0 ou 1	3
2 ou 3	2
4 a 9	1
10 ou mais	0

Fonte: Acústica e Vibrações (2002)

É importante ressaltar que a sensação de ruído varia de pessoa a pessoa, mas a medição sonora ajuda na avaliação deste som em condições de trabalho distintas. As legislações acerca do assunto impõem limites máximos de nível de pressão sonora a que o ser humano pode ficar exposto, conforme se pode observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites máximos de nível de ruído permitido por diferentes legislações

Legislação	Nível máximo de ruído admissível (decibéis)	Conseqüência da exposição a níveis superiores
Organização Mundial de Saúde (O.M.S.)	65 dB(A)	Estresse e aumento do risco de doenças
	85 dB(A)	Aumento do risco de comprometimento auditivo
Organização Internacional do Trabalho (O.I.T.)	85 dB(A)	Limite de alerta
	90 dB(A)	Limite de perigo
	115 dB(A)	Limite para utilização de protetores auriculares
NBR 10.152/1987 (nível de ruído para restaurantes populares)	50 dB(A)	Nível sonoro para conforto
	60 dB(A)	Nível sonoro aceitável para a finalidade
NR-15 (Ministério do Trabalho e Emprego)	85 dB(A)	Para exposição máxima admissível de 8 horas diárias
	115 dB(A)	Limite para utilização de equipamentos de proteção

Fonte: Adaptado de NAVARRO (2004)

KUSUKAWA (2002 *apud* NAVARRO, 2004) apresentou uma coletânea dos níveis de ruído máximos admissíveis em normas internacionais, através da qual se observa que o valor de 85 dB(A), adotado pela Norma Regulamentadora (NR) 15, do Ministério do Trabalho, encontra-se em consonância com os limites adotados em outros países.

É importante destacar que o nível de pressão sonora não é o único indicador de insalubridade para o usuário do ambiente, mas também é importante destacar o tempo de exposição do mesmo a tais níveis de pressão sonora. A Tabela 4 apresenta os valores adotados pela NR-15.

Tabela 4 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente

Nível de ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e trinta minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

2.2. Tempo de reverberação e coeficiente de absorção sonora

Para SILVA (1971), entende-se por tempo de reverberação (TR) o tempo necessário, para que o nível de pressão sonora de determinado ambiente seja reduzido em 60dB, a partir do momento em que a fonte de excitação for extinta ou desligada.

Várias fórmulas analíticas vêm sendo propostas para avaliá-lo. Há mais de 100 anos, um professor de física de Harvard chamado Wallace Sabine desenvolveu a primeira fórmula para o cálculo do tempo de reverberação, a qual recebeu o seu sobrenome, sendo ainda bastante útil. A fórmula de Sabine é simplesmente dada por:

$$TR(60) = \frac{0,161V}{\sum_i S_i \alpha_i} \quad [2]$$

Onde:

TR(60) – tempo de reverberação em (segundos);

V – Volume do ambiente (m³);

S_i – Área da superfície do material (m²);

α_i – Coeficiente de absorção do material em uma dada frequência, em cada superfície S_i ;

Outras fórmulas foram desenvolvidas para o cálculo do tempo de reverberação a exemplo da fórmula de Eyring, entretanto estas fórmulas apresentam limitações em sua aplicabilidade, sendo este o principal motivo que levou ao desenvolvimento de fórmulas posteriores.

BISFATA e BRADLEY (2000) estudaram a precisão de diversas formulações para o cálculo do TR, através da comparação de resultados obtidos entre as fórmulas propostas por Sabine e Eyring e aqueles obtidos através de medições de laboratório, simulando o ambiente de uma sala de aula, com vários tipos de disposição de material acusticamente absorvente. De forma que as fórmulas para o cálculo do TR analisadas em seu trabalho podem ser reduzidas à seguinte fórmula:

$$TR = 0,161 \frac{V}{S_a + 4mV} \quad [3]$$

Onde:

V – volume do ambiente, em m^3 ;

S – área total do ambiente, em m^2 ;

a – coeficiente de absorção acústica do ambiente; e

m – coeficiente de absorção acústica do ar, com valor máximo, na frequência de 2.000Hz, de 0,0082 sabine-metros, para 70% de umidade relativa do ar e temperatura de 30°C. (BERANEK, 1971 *apud* NAVARRO, 2004)

Observe que com relação à absorção do ar, presente na fórmula para o cálculo do TR, a mesma é sensível a temperatura, à composição atmosférica, à concentração de vapor d'água e à frequência sonora.

Uma das importantes observações que BISFATA e BRADLEY (2000) fizeram é que as fórmulas para o cálculo do TR se diferenciam umas das outras pelas diferentes abordagens utilizadas, para a determinação dos coeficientes de absorção dos materiais.

Para BISFATA e BRADLEY (2000), o coeficiente de absorção de Sabine é dado pela seguinte equação:

$$\alpha_{Sab.} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad [4]$$

Onde:

$\alpha_{\text{Sab.}}$ - Coeficiente de absorção de Sabine;

A equação básica do TR (Eq. 3) citado por BISFATA e BRADLEY (2000), se $a = \alpha_{\text{Sab.}}$ conduz a fórmula de Sabine (Eq. 2), porém agora considerando o coeficiente de absorção acústica do ar. Os coeficientes de absorção dos materiais a serem empregados nesta fórmula são expressos em sabines.

Inicialmente, o trabalho de Sabine foi limitado à frequência de 500 Hz, de modo que, quando a expressão “tempo de reverberação” é usada sem especificação de uma frequência em particular, entende-se que se refere a esta frequência. Posteriormente, seus estudos incluíram as bandas de oitava, entre 125 e 4.000 Hz. Desse modo, torna-se necessário especificar em que frequência o TR está sendo calculado.

EYRING (1933 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) verificou uma falha na fórmula de Sabine (Eq. 2), que consiste no fato de que, quando o $\alpha_{\text{Sab.}} = 1$, ou seja, a absorção do ambiente é total, o TR não é nulo. Desse modo, propôs uma fórmula de reverberação em que o coeficiente de absorção calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha_{\text{Eyr.}} = -\ln(1 - \alpha_{\text{Sab.}}) \quad [5]$$

Onde:

$\alpha_{\text{Eyr.}}$ - coeficiente de absorção de Eyring;

Note que se substituirmos $a = \alpha_{\text{Eyr.}}$ na Eq. (3) a mesma conduz a o valor de TR nulo para $\alpha_{\text{Sab.}} = 1$.

MILLINGTON (1932 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) observou que, com elevados coeficientes de absorção de materiais ($\alpha_{\text{Sab.}}$), a fórmula de Eyring produzia resultados de $\alpha_{\text{Eyr.}}$ maiores que 1. Desse modo, com o intuito de corrigir a fórmula de Eyring, Millington desenvolveu um equacionamento, o qual, quando utilizada para o cálculo de coeficientes de absorção de amostras em câmaras reverberantes, sempre resultava em coeficientes menores que 1.

A fórmula de Millington é dada pela fórmula básica (Eq. 3), utilizando o seguinte coeficiente de absorção:

$$\alpha_{Mil.} = -\frac{1}{S} \sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i) \quad [6]$$

Onde:

$\alpha_{Mil.}$ - coeficiente de absorção de Millington;

A fórmula de Millington apresenta o inconveniente de que, quando uma das superfícies do ambiente, mesmo que muito pequena, apresenta o coeficiente de absorção $\alpha_i = 1$, $\alpha_{Mil.}$ pode ser infinitamente grande e, dessa forma, gerar um TR igual a zero. Porém, supõem que esta condição não seja atendida na realidade.

CREMER e MÜLLER (1982 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) desenvolveram uma fórmula resultante da combinação das fórmulas de Eyring e de Millington, evitando, seus resultados inconsistentes. Pequenas subdivisões em cada superfície principal foram definidas, de modo que quando agrupadas as mesmas fossem capazes de determinar o coeficiente de absorção da superfície principal. O coeficiente de absorção de Cremer ($\alpha_{Cre.}$), conforme fora definido, é dado por:

$$\alpha_{Cre.} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij} \right) \right] \quad [7]$$

Onde:

S_{ij} – área da superfície de cada subdivisão j , da superfície principal i ;

α_{ij} – coeficiente de absorção de cada subdivisão de uma superfície principal.

Note-se que no caso onde a superfície principal tem um coeficiente de absorção uniforme, então $\alpha_{ij} = \alpha_i$, logo tem-se que $\alpha_{Cre.} = \alpha_{Mil.}$. Sendo assim, alguns resultados obtidos serão fisicamente impossíveis, conforme citamos anteriormente.

KUTTRUFF (1995 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) propôs uma correção no coeficiente de absorção de Eyring, para considerar a influência da não uniformidade de absorção das superfícies no ambiente e das diferentes trajetórias do som. Desse modo, ele introduziu um fator de correção no $\alpha_{Eyr.}$, obtendo o seguinte coeficiente:

$$\alpha_{Kut.} = \alpha_{Eyr.} \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \alpha_{Eyr.} \right) + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i) (\alpha_{Sab.} - \alpha_i) S_i^2}{S^2 (1 - \alpha_{Sab.})^2} \quad [8]$$

Onde:

$\alpha_{\text{Kut.}}$ – coeficiente de absorção de Kuttruff;

γ^2 – variação da trajetória do som = $\frac{\overline{l^2} - \bar{l}^2}{\bar{l}^2}$;

$l = \frac{4V}{S}$ – trajetória média do som;

$\overline{l^2}$ – valor quadrado médio da trajetória do som entre duas reflexões subseqüentes.

O primeiro termo na Eq. (8) refere-se à influência das diferentes trajetórias do som, enquanto o segundo refere-se à não uniformidade de absorção das superfícies.

FITZROY (1959 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) verificou experimentalmente, em salas onde a absorção não é uniformemente distribuída, que as fórmulas de Sabine e Eyring fornecem tempos de reverberação que geralmente se distanciam das medições. De acordo com experimentos realizados, estas fórmulas resultam em valores de TR inferiores aos resultados obtidos experimentalmente.

Devido a este fato, uma nova formulação fora proposta por Fitzroy em que o coeficiente de absorção é calculado por uma média ponderada das áreas, usando o coeficiente de absorção de Eyring nas três direções ortogonais. Assim:

$$\alpha_{\text{Fit.}} = -S \left[\frac{S_x}{\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{S_y}{\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{S_z}{\ln(1 - \alpha_z)} \right]^{-1} \quad [9]$$

Onde:

$\alpha_{\text{Kut.}}$ – coeficiente de absorção de Fitzroy;

S_x – soma das áreas do teto e do piso;

S_y – soma das áreas das paredes laterais;

S_z – soma das áreas das paredes de fundo e frente;

α_x – coeficiente de absorção do teto e do piso;

α_y – coeficiente de absorção das paredes laterais;

α_z – coeficiente de absorção das paredes de fundo e frente.

Baseado na experiência de Fitzroy, ARAU-PUCHADES (1988 *apud* BISFATA e BRADLEY, 2000) propôs uma fórmula de reverberação em que o coeficiente de absorção é dado pela ponderação do coeficiente de absorção de Eyring em cada uma das principais direções, conforme segue:

$$\alpha_{\text{ArP.}} = \left[-\ln(1 - \overline{\alpha}_x) \right]^{S_x/S} \cdot \left[-\ln(1 - \overline{\alpha}_y) \right]^{S_y/S} \cdot \left[-\ln(1 - \overline{\alpha}_z) \right]^{S_z/S} \quad (1)$$

Onde:

$\alpha_{\text{ArP.}}$ – coeficiente de absorção de Arau-Puchades.

Os resultados das comparações realizadas por BISFATA e BRADLEY (2000) revelaram que as fórmulas que utilizam os coeficientes de absorção de Arau-Puchades e Cremer foram as que previram o TR com menor margem de erro para o caso de inteligibilidade em salas de aula, seguidas pelas fórmulas de Sabine, Millington e Eyring, respectivamente. As que resultaram em erros maiores no cálculo do TR foram as fórmulas de Kuttruff e Fitzroy.

Apesar das comparações efetuadas e dos resultados obtidos, os autores não destacaram qual a fórmula mais precisa, afirmando que todas são passíveis de erros em determinada situação, por isso eles afirmaram que “não há necessidade de se usar a mais complexa expressão analítica, pois ela não garante resultados precisos para o cálculo do TR” (BISFATA e BRADLEY, 2000). Por fim, indicaram o uso das fórmulas de Sabine e Eyring, devido à sua maior simplicidade e à relativa precisão destas em relação às melhores previsões.

As configurações de absorção sonora escolhidas para as comparações feitas por BISFATA e BRADLEY (2000) foram típicas de sala de aula, com os materiais absorventes aplicados no teto. Foram montados dez esquemas de análise, onde aplicaram materiais absorventes em diferentes quantidades e configurações.

Baseado nas simulações efetuadas observou-se que, quando um tratamento acústico é dado a um ambiente não tratado, ocorre uma redução significativa no tempo de reverberação do mesmo. No entanto, o fator de adicionar material absorvente não implicou em se obter reduções proporcionais no TR, ou seja, ao se atingir determinado limite de absorção, as reduções no TR não foram mais significativas.

É importante destacar que nos ambientes das salas de aula simuladas, o menor tempo de reverberação não fora alcançado pela configuração que possuía maior quantidade de material absorvente, com 100% do teto revestido, e sim na configuração com 50% de

revestimento do teto nas configurações em que esse percentual foi arranjado em torno do limite superior das paredes e formando um anel ao redor do teto. Desta forma, observou-se ainda que quando o material absorvente era disposto concentrado em determinadas áreas da sala tende a produzir tempos de reverberação mais longos que aqueles obtidos quando a mesma quantidade de material é aplicada seguindo uma certa distribuição.

Verificaram-se assim as diversas imprecisões nas fórmulas estudadas, a exemplo da fórmula de Sabine, que prevê o mesmo tempo de reverberação para a mesma área de absorção, não considerando as diferenças no TR em função dos diversos arranjos do material. Os autores ainda concluem que as imprecisões ocorridas podem ter origem no fato que o modelo teórico da qual derivam as equações estudadas requerer que o ambiente apresente um campo sonoro difuso, o qual consiste em uma região onde a densidade média de energia é a mesma em qualquer ponto, e todas as direções de propagação são igualmente prováveis (KINSLER *et al.*, 1982), ou seja, o som é refletido diversas vezes, enquanto se propaga, criando uma área homogênea no que se refere à distribuição sonora. No entanto, essa condição não fora verificada em salas de aulas, onde se tem uma diretividade na propagação do som proveniente do orador.

O fato de não garantir que o campo sonoro difuso no ambiente de salas de aula, fez com que BISFATA e BRADLEY (2000) não fossem conclusivos neste estudo comparativo, não destacando, dentre as fórmulas analisadas, a mais apropriada para o ambiente estudado, pois todas as fórmulas se revelaram inconsistentes para o cálculo do TR em ambientes cujo campo sonoro não é difuso.

EVEREST (2001 *apud* NAVARRO, 2004) listou algumas características peculiares do campo sonoro difuso, dentre as quais, podem ser destacadas as seguintes:

- As flutuações súbitas no decaimento do som devem ser insignificantes;
- O decaimento sonoro deve ser perfeitamente exponencial;
- O tempo de reverberação deve ser o mesmo em qualquer posição da sala (quando o TR varia de um lugar para outro dentro do mesmo ambiente, é uma indicação de que não há homogeneidade no campo sonoro);
- As características do decaimento sonoro devem ser as mesmas para qualquer frequência.

Absorção sonora consiste em reduzir a reflexão sonora que incide sobre uma superfície. A energia sonora absorvida pelo material é parcialmente dissipada, como energia térmica, e parcialmente transmitida, transmissão essa quer seja através de energia refletida ou através de energia transmitida pela estrutura do material ao outro meio no qual está inserido o material.

Transmissão é a propriedade sonora que permite que o som passe de um lado para outro de uma superfície, continuando sua propagação. Fisicamente, o fenômeno tem as seguintes características: a onda sonora ao atingir uma superfície, faz com que a mesma vibre, transformando-a em uma fonte sonora. Assim, a superfície vibrante passa a gerar som em sua outra face.

Quando uma onda sonora incide sobre um obstáculo, três situações são possíveis de ocorrer, são elas: 1) a onda sonora é transmitida através do material; 2) a onda sonora pode ser absorvida pelo obstáculo; e 3) a onda sonora poderá ser refletida. De modo que essas situações podem ocorrer individualmente, simultaneamente ou em combinações de duas dessas situações.

Cabe destacar que quando se pretende realizar um tratamento acústico do ambiente que vise a absorção acústica pretende-se a redução do nível de pressão sonora para melhoria da inteligibilidade dos sons que estão sendo produzidos em um determinado ambiente, enquanto que o isolamento acústico se propõe a não permitir que os sons gerados em um ambiente se propaguem através dos materiais constituintes do mesmo para outro ambiente. Segundo BARING (1988), o termo “isolamento acústico” refere-se ao nível de perda de transmissão do conjunto dos elementos construtivos da edificação (paredes, lajes, janelas e portas), se diferenciando do termo “isolação sonora”, que apresenta o valor da perda de transmissão de um elemento isolado.

Os materiais absorventes acústicos são de grande importância no tratamento de ambientes. As Normas Brasileiras especificam os procedimentos para o tratamento acústico de ambientes fechados. A dissipação de energia sonora por materiais absorventes depende fundamentalmente da frequência do som: normalmente é grande para altas frequências, caindo para valores muito pequenos para baixas frequências. A tabela 5 apresenta alguns valores de referência para o coeficiente de absorção acústica, conforme NBR 12.179/92.

Tabela 5 – Coeficiente de absorção acústica

Materiais	Espessura (cm)	Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Reboco áspero, cal		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso		0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Superfície de concreto		0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Lã de rocha	10	0,42	0,66	0,73	0,74	0,86	0,79
Lã de vidro solta	10	0,29	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Feltro de fibra natural	0,5	0,09	0,12	0,18	0,30	0,55	0,59
Placas de cortiça sobre concreto	0,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Tapete de lã	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75

3. GERAÇÃO DE RESÍDUO DE EVA E A PRODUÇÃO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM RESÍDUO DE EVA

De acordo com TRICHES e SILVESTRI (2007), o Brasil é reconhecido como o exportador de calçados de couro para passeio, preponderantemente para o segmento feminino, embora ocorram embarques de outros tipos, em menor volume.

A maioria das empresas produtoras de calçados estão localizadas no estado do Rio Grande do Sul, entretanto a produção nacional vem cada vez mais se apresentando distribuída por outras regiões, como a Sudeste e a Nordeste, destacando-se nessa os estados do Ceará, Bahia e Paraíba.

A parcela de mercado, representada pela quantidade exportada de calçados de um determinado Estado sobre o total exportado pelo Brasil em milhões de pares de calçados, entre os anos de 2002, 2006 e o primeiro bimestre de 2007, está distribuída conforme a tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Parcela de mercado de alguns Estados exportadores de calçados

ESTADOS	Ano					
	2002		2006		2007*	
	Pares (MILHÕES)	Parcela de Mercado (%)	Pares (MILHÕES)	Parcela de Mercado (%)	Pares (MILHÕES)	Parcela de Mercado (%)
RIO GRANDE DO SUL	115	70%	81	47%	14,8	44,5%
SÃO PAULO	15	9%	17	10%	2,5	7,6%
CEARÁ	24	15%	45	26%	10,9	32,8%
BAHIA	5	3%	6	3%	0,7	2,2%
PARAÍBA	3	2%	18	10%	2,8	8,5%
MINAS GERAIS	1	1%	1	1%	0,3	1,0%
PERNAMBUCO	1	1%	5	3%	0,7	2%

Fonte: Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (2007)

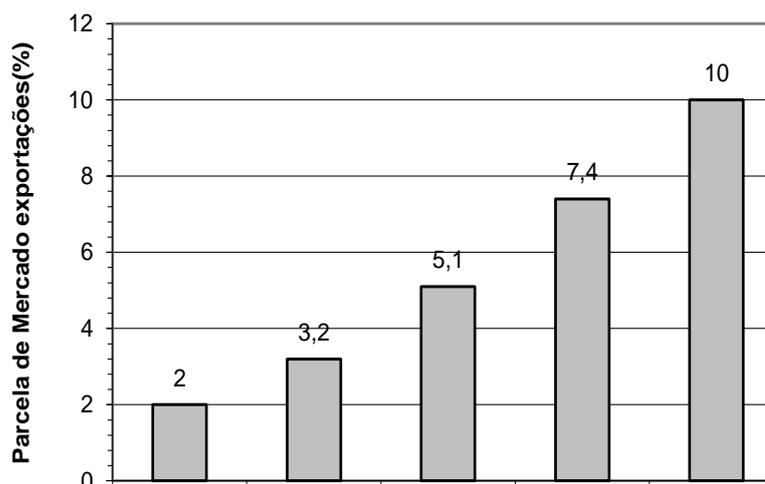
(*) Valores acumulados até fevereiro de 2007

Observa-se que a participação do estado da Paraíba obteve o maior aumento na parcela de mercado das exportações no período compreendido entre os anos de 2002 e 2006, chegando a quintuplicar este índice no respectivo período. Nota-se ainda que no primeiro bimestre de 2007, o estado detém o terceiro maior índice.

Ainda no que tange à distribuição regional da produção de calçados no Brasil, pode-se notar uma forte tendência de deslocamento da produção em direção à região Nordeste do país. São várias as empresas, especialmente as de maior porte, que têm procurado estabelecer unidades produtivas na região Nordeste, especialmente nos Estados da Paraíba e do Ceará.

A Paraíba obteve um crescimento aproximadamente linear (Figura 1) na sua parcela de mercado, com um incremento contínuo no volume de produção de pares de calçados, conforme pode ser observado no gráfico a seguir, representando assim uma maior geração de resíduos industriais que tem fundamental importância no tema abordado na presente pesquisa.

Figura 1 – Crescimento da parcela de mercado de exportação de calçado do Estado da Paraíba



Fonte: Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (2006)

(*) Valores acumulados até fevereiro de 2007

3.1. Produção do resíduo de EVA

O aproveitamento de resíduos industriais, através de sua incorporação em materiais destinados à construção civil, tem se mostrado uma alternativa válida. A ideia dos três “R” (erres), ou seja, redução, reciclagem e reutilização de resíduos, deve ser valorizada em contraposição à simples otimização dos sistemas de descarte que apenas protelam a solução do problema de agressão ambiental.

O setor da construção civil apresenta-se com potencial para absorver os resíduos industriais. Concorrem para isto a necessidade de redução do custo da construção, a grande quantidade de matéria-prima utilizada e a diversidade de materiais empregados na produção, ampliando as opções de uso de resíduos com diferentes funções na edificação (CINCOTTO, 1988 *apud* BEZERRA, 2002).

Na utilização de novos materiais provenientes de resíduos industriais na construção civil, é necessário avaliar seu potencial de utilização. CINCOTTO (1988 *apud* GARLET e

GREVEN, 1997) propõe critérios de avaliação baseados nos estudos da *Réunion International des Laboratories d'Essais et Matériaux* (RILEM).

De acordo com esse autor os principais critérios, entre outros, são:

- A quantidade disponível em um local deve ser considerável para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte. Conforme descrito anteriormente, a indústria de calçados apresenta um crescimento significativo no estado da Paraíba, justificando plenamente o desenvolvimento de estudos nesta área;
- As distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas como os materiais tradicionais (brita e areia).

3.2. Processo produtivo das placas expandidas de EVA

O EVA é um composto micro-poroso constituído por resina de EVA, agente de expansão, agente reticulante, cargas ativadoras e auxiliares de processo, além de outros polímeros, como borracha.

Dentre os componentes do EVA destaca-se em grau de importância a resina, pois a mesma contém acetato de Vinila, cuja quantidade define as propriedades do composto produzido. À medida que este teor aumenta, suas propriedades tornam-se mais próximas à borracha ou ao PVC plastificado, em caso contrário o mesmo apresenta propriedades similares ao polietileno de baixa densidade.

O EVA é obtido por polimerização, via radicais livres, do Etileno com Acetato de Vinila em reatores de alta pressão. Sua elevada homogeneidade na concentração de acetato de vinila garante estabilidade no processamento, assegurando qualidade uniforme no produto final, que tem como principais características: alta elasticidade, flexibilidade, resistência mecânica, soldabilidade, elevada resistência à quebra, sob tensões ambientais e a baixas temperaturas (TECPAR, 2005).

De acordo com PREZOTTO (1990 *apud* GARLET e GREVEN, 1997), a indústria de calçados utiliza o EVA na produção de diversos componentes de seus produtos finais, seja nos solados, entressolas e palmilhas, de maneira que essa indústria é responsável por aproximadamente 69% do mercado de EVA produzido no país.

Os resíduos de EVA são gerados em dois processos distintos, sendo uma no processo de fabricação de placas expandidas e a outra no processo de fabricação do calçado propriamente dito.

Segundo BEZERRA (2002), o processo de fabricação das placas expandidas ocorre da seguinte forma:

- Pesagem – etapa importante no processo, em que cada matéria-prima deve ser pesada na quantidade certa para obtenção da mistura. Qualquer erro de pesagem pode comprometer todo o processo;
- Mistura – o processo de mistura das matérias-primas é realizado em máquinas especiais, de preferência tipo “*bambury*”, à temperatura inicial de aproximadamente 85°C e final de aproximadamente 105°C;
- Calandragem – passa-se a massa através de rolos. Tem como objetivo laminar a massa na espessura desejada, deixar a superfície homogênea e lisa, além de evitar possíveis retenções de ar. Após o processo de calandragem, a massa é resfriada, cortada em dimensões pré-determinadas e levada para o molde;
- Prensagem e expansão das lâminas – deve-se fazer a prensagem com cuidado para que a placa não sofra oscilações de qualidade. É importante controlar a pressão interna do molde, a temperatura de prensagem e o tempo de desmoldagem das placas, agora já expandidas;
- Acabamentos finais – faz-se o corte nas placas, conforme detalhe do produto, e o lixamento na superfície da placa expandida.

Os resíduos gerados durante o processo de fabricação das placas se dão em forma de aparas, surgidas após o processo de expansão das placas, e em forma de pó (Figura 2), que surge durante o lixamento das placas. Esses são reincorporados ao processo de fabricação das placas em forma de cargas, fazendo dessa forma um fácil reaproveitamento da matéria utilizada.

Durante o processo de fabricação do calçado são gerados outros resíduos, sejam em forma de retalhos ou sobras inevitáveis das placas expandidas (Figura 3) oriundos do processo de corte para obtenção dos formatos dos calçados e possíveis refugos de solado, entressola ou palmilha dos mesmos, sejam em forma de pó advindo do lixamento do calçado na fase final

de acabamento, sendo esses reaproveitados da mesma forma que os gerados no processo de fabricação das placas expandidas.

Figura 2 – Resíduo em forma de Pó



Fonte: POLARI FILHO (2003)

Figura 3– Resíduo em forma de aparas



Fonte: BEZERRA (2002)

Os resíduos que surgem do processo de corte na fabricação do calçado são os de maior volume e o mecanismo de reaproveitamento exige alguns cuidados especiais, tais como: não usar recuperado de diferentes níveis de reticulação, pois irá gerar oscilação de qualidade nas placas expandidas; evitar retalhos que tenham excesso de silicone; eliminar todo ar existente no material a ser recuperado. Além disto, este processo de reciclagem é lento e existe limitação técnica (Figura 4), quanto à quantidade de resíduos que pode ser incorporado ao processo, sem comprometer a qualidade do produto. Portanto o volume de resíduo reaproveitado na própria indústria é bem menor, não mais que 40% do volume gerado. (BEZERRA, 2002)

Figura 4 - Etapa do processo de reciclagem de sobras em forma de aparas



Fonte: BEZERRA (2002)

O crescente volume excedente de resíduos tornou-se um problema para as indústrias no momento em que vão dar um destino final aos mesmos. A deposição desse material não pode se dar em qualquer local, se realizada em aterros sanitários pode representar sérias implicações ao meio ambiente, visto que possuem baixa velocidade de degradação, ou seja, não são biodegradáveis.

GARLET (1998) afirma que várias indústrias os depositam em áreas a céu aberto, causando problemas ambientais, como poluição visual, proliferação de insetos e pequenos animais, além de existir uma ameaça constante de combustão do material. Por outro lado, algumas indústrias depositam esses resíduos em aterros clandestinos, situados em locais de difícil acesso, de modo a evitar fiscalizações dos órgãos competentes. A falha na fiscalização tem contribuído para esse tipo de comportamento das indústrias, sobretudo aquelas que geram grandes volumes de resíduos.

Algumas empresas estocam seus resíduos em galpões (Figura 5), porém essa opção tem limitação, pois o volume de resíduo ultrapassa a capacidade de armazenamento dos mesmos e passam então a serem estocados em pátios, e assim sucessivamente, tornando-se um problema de gravidade crescente e com limitações de áreas que as empresas possuem.

Figura 5 - Resíduos da indústria de calçados, ensacados e armazenados em galpões



Fonte: BEZERRA (2002)

De acordo com BEZERRA (2002), outras indústrias estão negociando seus resíduos com as indústrias de cimento, na tentativa de livrar-se deles. Essas por sua vez aproveitam o potencial combustível do resíduo para alimentar os fornos rotativos na fabricação de clínquer.

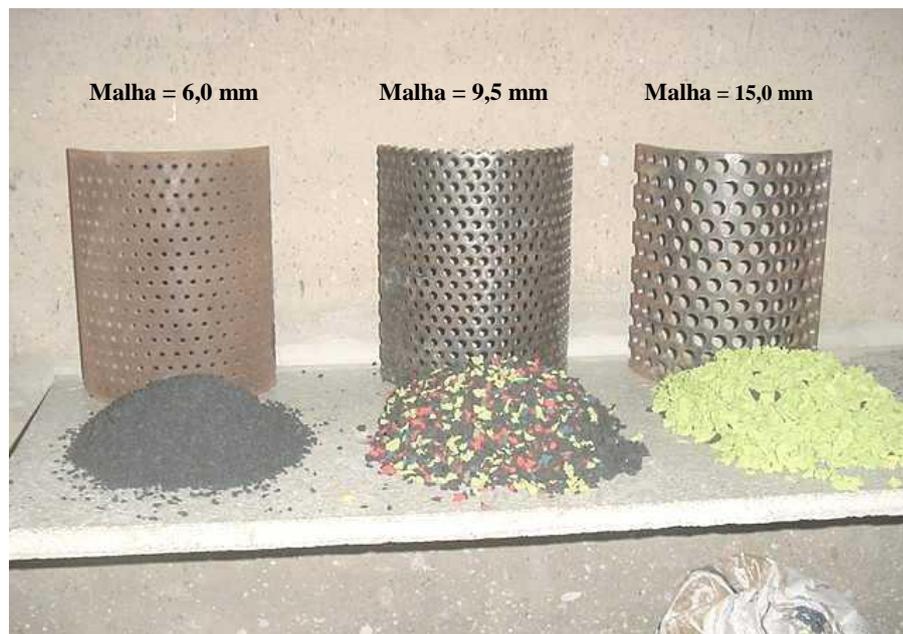
De acordo com COLLEPARDI (1999 *apud* BEZERRA, 2002), a colocação desse tipo de resíduo e de outros tipos de resíduos combustíveis ricos em enxofre no forno rotativo nas indústrias cimenteiras, que vem ocorrendo desde 1980, tem aumentado o teor de sulfato na produção de clínquer dos cimentos Portland. Isto pode estar promovendo o crescimento da deterioração dos concretos estruturais nos últimos anos, e uma das causas é devido à formação retardada de produtos expansivos, etringita secundária, no concreto endurecido, estando diretamente associada a esse aumento do teor de sulfato nos aglomerantes e na microestrutura dos concretos de cimento Portland.

Assim sendo, essa solução não se mostra sustentável, pois o que ocorre é apenas uma transferência de problema de uma localidade para outra. Cabe então estudar alternativas sustentáveis de reaproveitamento dos resíduos produzidos.

3.3. Produção de agregado artificial de EVA

O processo de obtenção de agregado artificial de EVA ocorre através da trituração de retalhos e refugos de placas e solas, em granulometrias determinadas através da inserção de malhas de peneiras (Figura 6) colocadas na saída do moinho granulador (Figura 7).

Figura 6 – Detalhe das malhas das peneiras e do agregado artificial de EVA



Fonte: BEZERRA (2002)

Figura 7 – Moinho granulador



Fonte: BEZERRA, 2002

De acordo com a malha utilizada na saída do moinho granulador são produzidos agregados de granulometria e volume de produção dados conforme a Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Malhas das peneiras com respectivas dimensões máximas dos agregados obtidos e produção

Malha da Peneira (mm)	D _{máx} do Agregado (mm)	Produção de Agregado	
		(dm ³ /h)	(kg/h)
15	12,5	380	45
9,5	9,5	190	25
6	4,8	70	10

Fonte: BEZERRA (2002)

4. O RESÍDUO DE EVA COMO MATERIAL ABSORVENTE ACÚSTICO

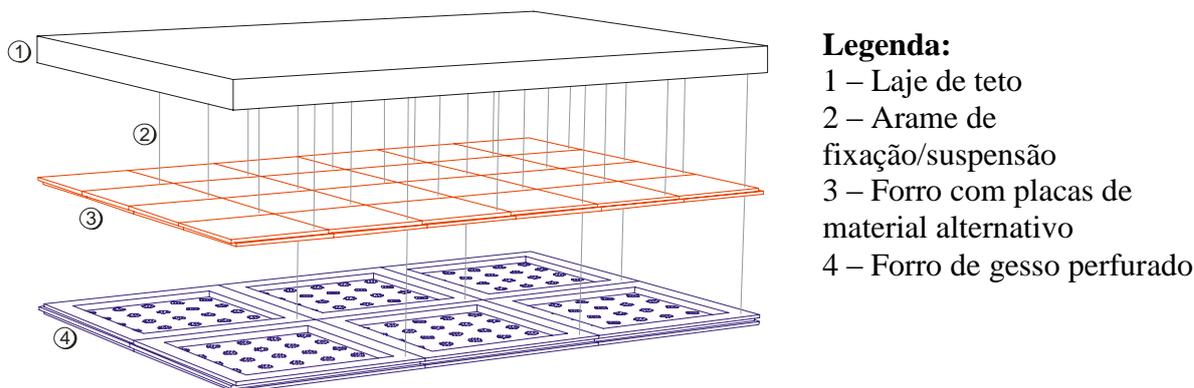
Diversas pesquisas vêm sendo conduzidas no sentido de estudar materiais alternativos de baixo custo para uso em absorção acústica, tais como fibras, produtos naturais e resíduos industriais. SANTOS (2005) produziu compósitos fabricados com resíduos de EVA granulado, aglomerado com cimento. Em seu experimento, foram confeccionadas placas de 4 cm de espessura, a partir da mistura de granulado de EVA retido na peneira 6 mm e cimento, utilizando o traço em volume 1(cimento):5(granulado), com pequena energia de prensagem. Os resultados obtidos mostraram potenciais utilizações destes materiais como revestimento acústico

No estudo ora apresentado, a premissa inicial para confecção dos protótipos em forma de placas é que os mesmos poderiam ser utilizados como revestimento de teto, ou seja, como forro opcional que seriam instalados sobre forros falsos, ou mesmo como forro aparente, conforme a necessidade de utilização e o critério estético do ambiente. Caso sejam instalados sobre forros convencionais de gesso, esses deverão receber aberturas de modo que o fluxo de ar ocorra através destas aberturas e venha a ser absorvido pelas placas confeccionadas com materiais alternativos.

As dimensões dos compósitos produzidos foram definidas em função das dimensões das placas de gesso utilizadas na região onde está sendo realizado o estudo, que são produzidas nas dimensões de 61x61cm. Em função desta, foi concebido então a produção de placas de menor dimensão, resultando em menor peso e facilitando o manuseio e instalação das mesmas.

Definiu-se então que as placas fossem confeccionadas medindo 31x31cm, pois desta forma o conjunto de quatro destas placas, quando montadas, corresponderia a uma placa de gesso, pois haveria uma superposição de 1 cm entre as placas para encaixe, resultando assim nas dimensões de uma placa de gesso, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de montagem dos forros



Conforme descrito anteriormente, a hipótese inicial é o uso de placas constituídas de materiais alternativos a serem utilizadas como um segundo forro, o qual seria instalado acima de forro de gesso perfurado, porém outra opção é o uso em substituição aos materiais absorventes acústicos, onde os mesmos são instalados sobre estruturas suporte confeccionadas nos mais diversos tipos de materiais, a exemplo de perfis metálicos, grades de madeira, etc. podendo assim ficar aparente ou envolto em material plástico, pois essa é uma solução comumente adotada no tratamento acústico de ambientes, conforme Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Forro em lã de rocha envolta em sacos plásticos preto sobre estrutura de grades em madeira utilizada no Aeroporto Internacional dos Guararapes – Recife/PE



4.1. Espessura das placas

Segundo MEHTA *et al.* (1999), o valor do coeficiente de absorção sonora de um determinado material, para os materiais porosos, é proporcional à espessura. Isto ocorre porque a velocidade das partículas do fluido (ar, no caso) é máxima à distância de $0,25\lambda$ do substrato, sendo λ o valor do comprimento da onda sonora analisada, o qual está relacionado com a frequência da onda sonora, f , pela equação 10, conforme segue:

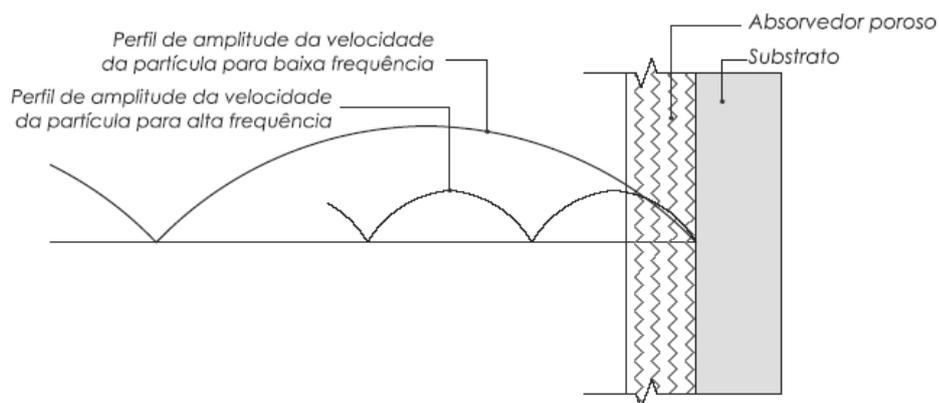
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [10]$$

Na Eq. 10 c é a velocidade de propagação do som no ar.

Se a espessura do material absorvente é pequena, a máxima velocidade das partículas ocorre fora do mesmo, levando a um baixo valor de absorção. Entretanto, se aumentarmos a espessura do material a velocidade máxima irá ocorrer no interior do material, aumentando-se assim a faixa de efetividade do material absorvente em termos de frequência.

Aplicando o material a uma distância de $0,25\lambda$ do substrato, o mesmo terá seu potencial de absorção acústica aumentado, pois poderá ser utilizado um material de menor espessura para absorver ondas sonoras em frequências mais baixas, conforme pode ser ilustrado na Figura 10. Os valores máximos das velocidades das partículas ocorrem às distâncias de $0,25\lambda$, $1,25\lambda$, etc., afastado do substrato, tornando-se assim uma solução economicamente viável, uma vez que serão exigidos materiais de espessura menor pelo simples fato de serem instaladas à determinada distância do substrato.

Figura 10 – Comparação da variação da amplitude de velocidade para altas e baixas frequências superposta sobre uma seção de material poroso e substrato



Fonte: De acordo com MEHTA *et al.* (1999)

Conforme descrito anteriormente, a espessura do material está correlacionada com o comprimento de onda sonora, de modo que apresente melhores resultados quanto ao coeficiente de absorção sonora, pela equação 11 expressa a seguir:

$$e = 0,25\lambda \quad [11]$$

Para uma espessura das placas de 2,00cm, irá corresponder a uma melhor absorção para as frequências superiores a 4 kHz, se a mesma for instalada junto ao substrato (parede/teto/piso), porém se usada a mesma placa afastada de $0,25\lambda$ do substrato a mesma terá sua eficiência aumentada em faixas de frequência inferiores a 4 kHz, conforme descrito anteriormente. Importante lembrar que existem outros parâmetros, além da espessura do material, que tem relação direta com o coeficiente de absorção sonora, conforme citados anteriormente.

5. MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA EM CÂMARA REVERBERANTE

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não dispõe de normalização sobre a medição de absorção sonora em câmaras reverberantes, constando apenas do documento básico utilizado pela comissão técnica CE-02:135.01 que contém as diretrizes para a elaboração da norma nacional. Diante disso, a documentação internacional disponível para medição de absorção sonora em câmaras reverberantes é a norma ISO 354:2003 – *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, sendo essa também utilizada nos procedimentos adotados na presente pesquisa.

5.1. Características gerais do método de medição e definições

O procedimento que interessa neste trabalho refere-se, de uma forma geral, a medição dos tempos de reverberação sem e com amostra de teste instalada, de modo a determinar o coeficiente de absorção acústica do material.

O coeficiente de absorção acústica é definido como a razão entre a energia acústica absorvida e a incidente em uma determinada superfície, conforme já explicado anteriormente. No entanto, para medições em câmaras reverberantes, essa definição não se demonstra aplicável, visto que coeficientes maiores que a unidade podem ser encontrados em ensaios realizados com materiais altamente absorventes. Dessa forma, do ponto de vista físico haveria uma inconsistência, pois caso utilizado o conceito clássico de coeficiente de absorção, haveria uma absorção maior que a energia incidente, ou seja, o material estaria absorvendo energia do meio que está inserida. Sendo assim, é importante citar duas definições da norma ISO 354.

A área de absorção sonora equivalente de uma sala, em metros quadrados, é definida como a “*área hipotética de uma superfície totalmente absorvente sem efeitos de difração a qual, se fosse o único elemento absorvedor na sala, daria o mesmo tempo de reverberação da sala sob consideração*”;

A área de absorção sonora equivalente de uma amostra em teste é igual à diferença entre a área de absorção sonora equivalente da sala com e sem a amostra presente.

O coeficiente de absorção sonora, α_s , é definido como a razão entre a área de absorção sonora equivalente da amostra e sua área em m^2 . A norma ISO 354 atenta para que se evite uma possível confusão entre esse coeficiente de absorção, que deve ter o subscrito “s”, com aquele obtido em outros tipos de testes, a exemplo dos tubos de impedância e através

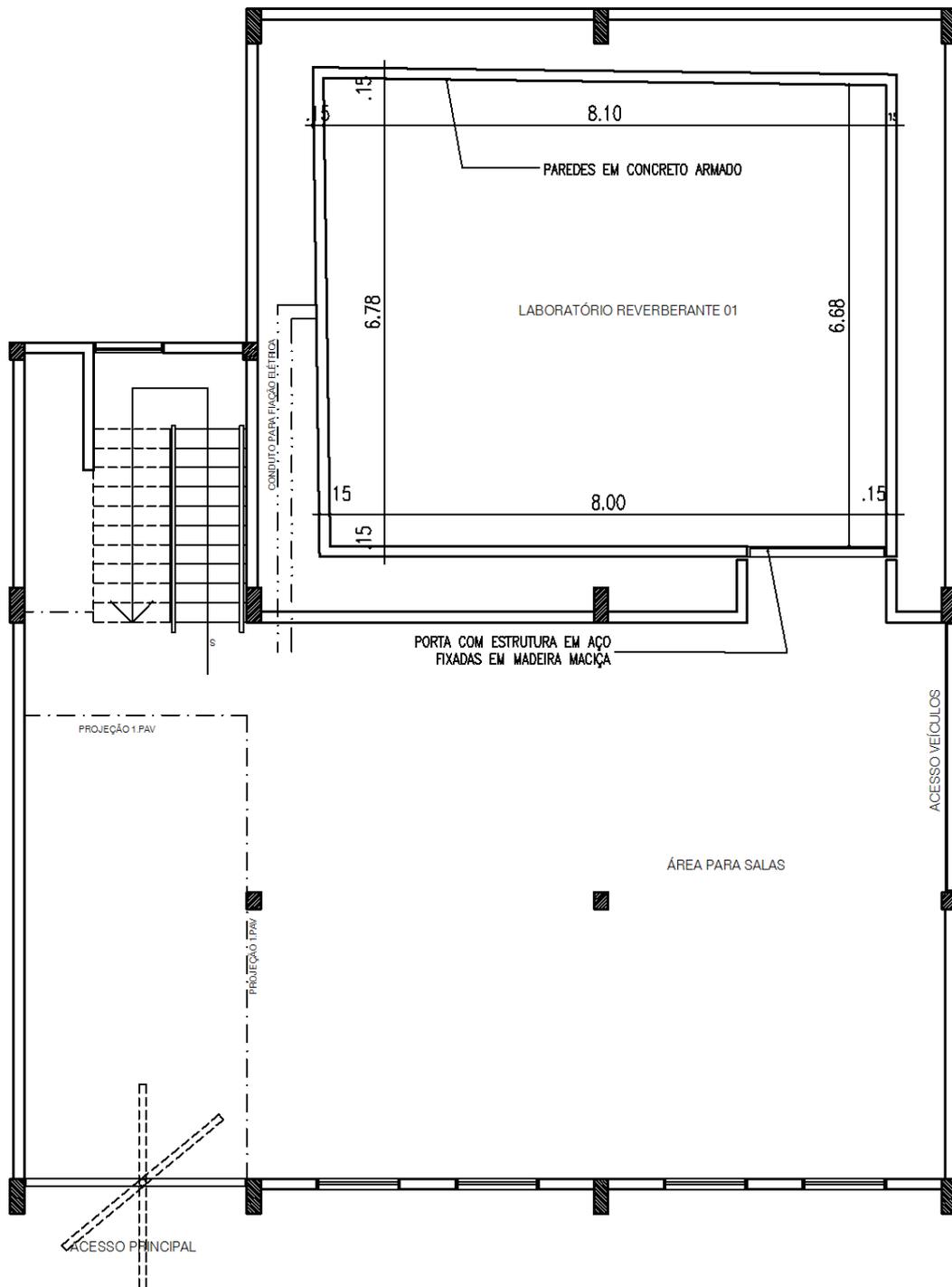
de métodos *in situ*, que não tem valor superior a unidade. Essa definição não se aplica a amostra de teste como objetos, cadeiras, etc.

A câmara reverberante do laboratório de Vibração e Acústica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) foi utilizada na determinação do coeficiente de absorção sonora das placas investigadas neste trabalho. É composta por paredes não paralelas de concreto aparente, porta de acesso em chapa de aço com fundo em madeira de lei, piso em concreto armado revestido com piso granilite em concreto e o teto em concreto armado e fixados difusores estáticos de chapas de aço de densidade de 5,2 kg/m². A planta baixa da câmara e suas características estão apresentadas na Figura 11 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 8 - Características gerais da câmara reverberante da UFPB

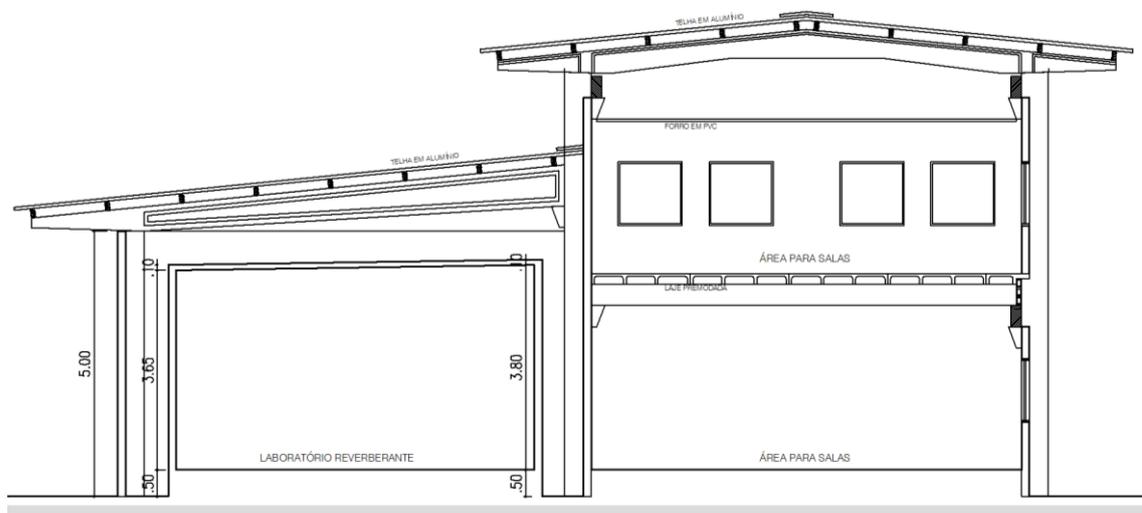
Características	
Volume	200,55 m ³
Área	217,78 m ²
Forma	parede não paralelas
Difusores	20 m ² de difusores em chapa de aço com áreas de 2,4 m ² , 1,4 m ² e 1,2 m ² . Massa por unidade de área igual a 5,2 kg/m ²

Figura 11 - Planta baixa laboratório reverberante da UFPB (câmara reverberante), sem escala



A figura 12 apresenta um corte esquemático passando no interior do laboratório reverberante, de modo a apresentar os valores da altura das paredes e teto da câmara reverberante.

Figura 12 - Corte esquemático laboratório reverberante



A norma ISO 354 recomenda que nas novas instalações (câmaras) o volume mínimo interno das mesmas seja de 200m³, entretanto volumes superiores a 500 m³ não devem ser utilizados, pois podem comprometer os resultados obtidos, principalmente nas frequências mais altas, tendo em vista que a absorção do ar passa a ser significativa. Conforme discriminado na Tabela 8, esse requisito está prontamente satisfeito nas instalações da câmara reverberante da UFPB.

A forma da câmara reverberante deve atender à seguinte condição:

$$l_{max} < 1,9 V^{1/3} \quad [12]$$

Onde, l_{max} é o comprimento da maior linha reta que pode ser traçada entre os contornos da sala, por exemplo, a maior diagonal no caso de câmara retangular, e V é o volume da câmara, em m³, sendo aquela medida nos contornos em planta baixa.

Da Figura 11, tem-se que l_{max} é igual a 10,56 m, sendo o volume dado na Tabela 8, logo a câmara reverberante atende à condição apresentada na Eq. 12, estando assim dentro dos critérios exigidos por norma.

Ainda com relação às características da câmara reverberante, a área de absorção equivalente da câmara sem a amostra não deve ultrapassar os valores constantes da Tabela 9 para volumes de 200m³. Caso o volume seja superior a esse, deve-se multiplicar os valores constantes da Tabela 9 pelo fator $(V/200)^{1/3}$, caso esse fator seja inferior a 1% o mesmo pode ser desprezado.

Tabela 9 – Área de absorção sonora equivalente máxima para câmara de volume $V=200\text{m}^3$

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Área de absorção sonora equivalente (m^2)	6,5	6,5	6,5	7,0	9,5	13,0

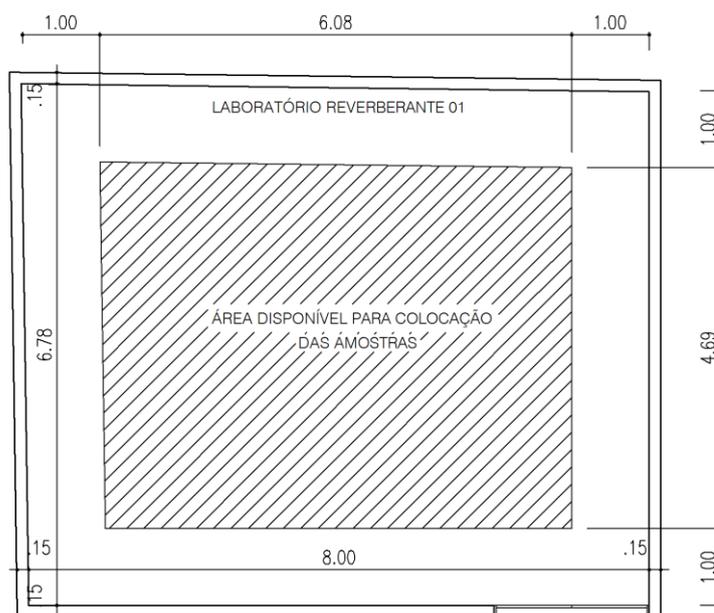
Os valores constantes da Tabela 9, na realidade limitam o tempo de reverberação da câmara sem amostra. Devem ser considerados inclusive quando for realizada a instalação dos difusores estáticos, uma vez que os mesmos aumentam a absorção da sala em toda a faixa de frequências, seja através da vibração das placas em baixas frequências ou com a redução do caminho livre médio entre reflexões.

5.2. Amostra de ensaio

Segundo o texto normativo (ISO 354:2003) e o documento básico utilizado pela comissão técnica CE-02:135.01, a área da amostra a ser ensaiada deve estar entre 10 e 12 m^2 . Se o volume da câmara for superior a 200 m^3 , o limite superior da amostra deve ser multiplicado pelo mesmo fator de correção da área de absorção sonora equivalente da câmara.

É recomendado que a amostra tenha forma retangular com uma relação entre o comprimento e a largura entre 0,7 e 1,0. A mesma deverá ser disposta afastada de no mínimo 1,0 m das bordas das paredes da câmara, e tal que preferencialmente as bordas não estejam paralelas à parede mais próxima. Sendo assim a amostra deve ficar posicionada no interior da área hachurada mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Área disponível para posicionamento das amostras a serem ensaiadas



Caso as amostras sejam colocadas diretamente sobre uma superfície da câmara, suas bordas devem ser totalmente cobertas por uma moldura de seção retangular construída de material acusticamente reflexivo e, em geral, de espessura inferior a 2 cm. A mesma não deve estender-se acima da amostra e nem deve apresentar folgas em relação à superfície da câmara onde está sendo montada. Utilizou-se no presente trabalho molduras confeccionadas em alumínio.

5.3. Condições ambientais

Algumas condições ambientais devem ser satisfeitas para a realização dos ensaios, uma delas determina que a umidade relativa do ar no interior da câmara deve ser maior que 40%.

Durante a execução dos ensaios a umidade relativa e a temperatura devem permanecer mais constantes quanto possível e atender no mínimo aos valores dados pela Tabela 10.

Tabela 10 – Temperatura e umidade relativa do ar durante realização dos ensaios

Umidade relativa (U.R.)	Varição máxima da umidade relativa durante as medições	Varição máxima da temperatura durante as medições	Limite inferior da temperatura
$40\% \leq \text{U.R.} \leq 60\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3^\circ\text{C}$	10°C
$> 60\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5^\circ\text{C}$	10°C

As amostras de ensaio devem entrar em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa do ar apresentadas pela câmara antes que se iniciem as medições.

5.4. Princípio de medição e método de cálculo

Conforme BISFATA e BRADLEY (2000), a expressão desenvolvida por Sabine, descrita na Eq. 4, para a reverberação é a base tanto da norma ISO 354:2003, como de outras (ASTM C423, 1999, BS 3638, 1963, NP 670, 1974), para a medição (cálculo) da absorção sonora de uma amostra em câmara reverberante. De modo geral, o método envolve a medição dos tempos de reverberação, razão de decaimento, da câmara sem e com a amostra de teste instalada sobre uma das superfícies da mesma.

A partir dos resultados dos tempos de reverberação, a área de absorção sonora equivalente da sala com e sem a amostra de teste são calculadas pela expressão de Sabine.

Essa diferença determina a área de absorção sonora equivalente correspondente à amostra ensaiada.

Diversas formulações foram desenvolvidas para o cálculo do tempo de reverberação, a exemplo da equação de Eyring, conforme apresentado na Eq.5. Entretanto esta formulação apresentou limitações em sua aplicabilidade, sendo este o principal motivo que levou ao desenvolvimento de equações posteriores. Vários pesquisadores (MILLINGTON, 1932; SETTE, 1932, FITZROY, 1959; NEUBAUER, 2000) desenvolveram expressões alternativas relacionando o tempo de reverberação com a área de absorção sonora equivalente de um ambiente, conforme apresentado no capítulo 2 deste trabalho. A maior parte dessas expressões assume a existência de um campo sonoro difuso perfeito, inclusive durante o decaimento, mas diferem no tratamento dado ao cálculo do valor médio do coeficiente de absorção das superfícies da sala. A formulação de Sabine será sumariamente discutida e aplicada à medição de absorção sonora segundo a norma ISO 354.

5.4.1. Formulação de Sabine

De acordo com ARAÚJO (2002), Sabine em sua metodologia para realizar o estudo sobre a duração da audibilidade do som residual em 1895, montou um sistema de medição que incluía um tubo de órgão com frequência de 512 Hz, alimentado através de um tanque com ar comprimido e controlado por uma válvula eletro-pneumática sincronizada a um cronômetro de boa qualidade. Acionando e desligando o tubo de órgão, Sabine conseguiu medir a duração da audibilidade residual ou o tempo para que o nível de som na sala atingisse o nível de ruído de fundo, ou nível de audibilidade mínima.

Para ARAÚJO (2002), apesar da simplicidade do sistema de medição, estudos da repetitividade realizados, alterando os operadores do cronômetro, apresentaram desvios padrão sempre abaixo de 3%, um resultado que, mesmo com a instrumentação e métodos experimentais atuais, deve ser considerado muito bom.

ARAÚJO (2002) ainda destaca que é importante observar que os volumes das salas utilizadas nesta fase da investigação eram da ordem de 1500 m³. Sendo assim, os fenômenos relacionados à ressonância e modos de normais de vibração praticamente inexistiam, principalmente na frequência utilizada durante a realização dos experimentos. Dessa forma seria de se esperar desvios espaciais baixos, como os encontrados por Sabine.

ARAÚJO (2002) destaca ainda que a “definição de tempo de reverberação utilizada até hoje, como o tempo necessário para que a energia sonora na sala seja reduzida em 1.000.000 de vezes, 60 dB, após a fonte sonora ter sido abruptamente desligada, é resultado destes estudos. Aplicando as condições iniciais à solução da equação para a reverberação na sala, Sabine conseguiu determinar quantas vezes a energia inicial do teste para um tubo de órgão era maior que a correspondente ao nível mínimo de audibilidade”.

Sabine desenvolveu inicialmente o que chamou de solução aproximada, para depois apresentar uma solução exata, resultados de estudos em diversas salas com volume e geometrias diferentes, cujo tratamento teórico foi mais rigoroso, e redundou na expressão utilizada pela norma ISO 354.

Um dos pontos importantes da formulação de Sabine para a reverberação em uma sala foi o entendimento de que o decaimento ocorre de forma contínua, e que a absorção total de suas superfícies é resultado da soma da absorção por metro quadrado de cada superfície multiplicada pela sua respectiva área.

Experimentos diversos foram realizados por Sabine, esses realizados com conjuntos de tubos diferentes cobrindo uma faixa de frequências de menos de 100 Hz até em torno de 4000 Hz, ampliando assim a aplicação de sua expressão. Ressalta-se que os experimentos eram realizados baseados na percepção do som pelo sistema auditivo, aferindo assim realismo aos resultados obtidos, visto que esses estudos pretendiam resolver problemas acústicos de salas. Há de ser considerado que Sabine utilizou materiais com baixa absorção em salas consideravelmente reverberantes, levando cerca de 8 segundos para atingir a condição de audibilidade mínima em 512 Hz, situação em que, mesmo se utilizados sinais para excitação da sala em banda larga de frequências, os desvios observados são sempre pequenos, uma vez que não foram introduzidos materiais altamente absorventes normalmente responsáveis por comprometer a difusão do campo sonoro durante o decaimento.

De acordo com a norma ISO 354:2003, a área de absorção sonora equivalente da câmara sem amostra, A_1 (m^2), é dada por:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad [13]$$

Na Eq. 13, T_1 é o tempo de reverberação médio da câmara, em segundos, sem amostra de teste, e m_1 é o coeficiente de absorção do ar, em m^{-1} , calculado de acordo com as

normas ISO 9613-1 (1993) e ISO 9613-2 (1996), para as condições ambientais da câmara sem amostra. Essa formulação é a mesma desenvolvida por Sabine.

A velocidade de propagação do som, para temperaturas na faixa de 15°C a 30°C, é dada por:

$$c = 331 + 0,6t \quad [14]$$

Onde t é a temperatura do ar, em graus Celsius.

De maneira análoga, a área de absorção sonora equivalente para a câmara contendo a amostra de ensaio, A_2 em m², é dada por:

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad [15]$$

Sendo agora T_2 o tempo de reverberação médio, em segundos, e m_2 o coeficiente de absorção do ar, em m⁻¹, para a câmara contendo a amostra de ensaio.

A área de absorção sonora equivalente da amostra, A_a , em m², conforme definido anteriormente, é dada pela diferença entre as áreas de absorção da câmara com e sem amostra. Dessa forma implica na subtração das equações 15 e 13 que resulta em:

$$A_a = \frac{55,3V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad [16]$$

Se mantidas as condições ambientais dentro dos limites estabelecidos pela Tabela 10, o termo correspondente aos coeficientes de absorção do ar na Eq. 16 pode ser ignorado. O coeficiente de absorção sonora do material, α_s , é obtido pela divisão da equação 16 pela área do mesmo, tem-se então:

$$\alpha_s = \frac{A_a}{S_a} \quad [17]$$

Onde S_a é a área da amostra de ensaio, em m².

Os tempos de reverberação utilizados em todas as expressões no presente trabalho, são valores médios espaciais calculados a partir dos valores medidos para cada combinação de posição de microfone e fonte sonora, conforme será descrito mais adiante no escopo deste trabalho, tanto para a câmara vazia, como com a amostra de ensaio instalada.

Note-se que a norma ISO 354:2003 propõe que a área de absorção sonora equivalente seja calculada ignorando a área do piso coberta pela amostra. Há apenas um

pequeno erro nos cálculos ao se desprezar a absorção da área coberta pelo material de ensaio, pois esse valor é sensivelmente menor do que o dos materiais de absorção normalmente utilizados. Um erro maior, todavia, resultaria certamente se fosse utilizado o coeficiente de absorção sonora da área coberta calculado a partir do tempo de reverberação da câmara vazia, onde esse tempo depende não somente da absorção das paredes, mas também da absorção de outros objetos (como porta, alto-falantes, luminárias), da dissipação da energia sonora no ar e das vibrações de paredes e do teto. Sendo assim o coeficiente de absorção sonora da superfície coberta não corresponderia apenas ao material que a constitui, e sim de outros elementos, conforme citados, que interferiram na determinação do coeficiente de absorção sonora das superfícies da câmara.

Dessa forma, tem-se então que o coeficiente de absorção sonora da amostra de material ensaiada, desprezando-se os termos referentes aos coeficientes de absorção sonora do ar, é dado por:

$$\alpha_a = \frac{55,3V}{S_a c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad [18]$$

Uma expressão alternativa, porém mais rigorosa, que leva em conta a área de absorção sonora coberta pela amostra de ensaio, pode ser obtida conforme o procedimento a seguir, o qual tem os efeitos de absorção do som desprezados, considerando as condições ambientais mantidas dentro dos padrões estabelecidos na Tabela 10.

Sendo a Eq. 17 a representação matemática da definição de coeficiente de absorção acústica de um dado material, o tempo de reverberação sem a amostra é dado por:

$$T_1 = \frac{55,3V}{cS\alpha_{vs}} \quad [19]$$

Onde S é a área total das superfícies da câmara, e α_{vs} é seu coeficiente de absorção sonoro médio calculado pela equação a seguir:

$$A_1 = S\alpha_{vs} = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n \quad [20]$$

Onde S_1, S_2, \dots, S_n são as áreas de cada superfície da câmara, em m^2 , com coeficientes de absorção sonora médios respectivamente $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

O tempo de reverberação médio da câmara com a amostra é dado por:

$$T_2 = \frac{55,3V}{c[(S - S_a)\alpha_{vs} + S_a\alpha_a]} \quad [21]$$

Trabalhando algebricamente a Eq. 21 de modo isolar no primeiro membro da equação o coeficiente de absorção sonora da amostra de material ensaiada, tem-se então:

$$\alpha_a = \frac{55,3V}{cS_a} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) + \alpha_{vs} \quad [22]$$

A diferença entre as expressões da norma ISO 354 (Eq. 18) e a Eq. 22 está exatamente na parcela correspondente ao coeficiente de absorção sonora médio da câmara sem a amostra, α_{vs} .

Entretanto, em todos os cálculos realizados neste trabalho no que se referem ao coeficiente de absorção sonora do material, utilizou-se apenas a Eq. 18, a qual despreza a área de absorção sonora encoberta pela amostra, pelos motivos anteriormente citados e por ser esse o procedimento normativo.

5.5. Medição do tempo de reverberação

O tempo de reverberação (TR) é o principal mensurando na medição da absorção sonora de materiais em câmaras reverberantes. De uma forma geral, a norma ISO 354 descreve dois métodos de medição do TR: o método da interrupção do ruído e o método da resposta impulsiva integrada.

No primeiro método, sendo este mais utilizado pelos laboratórios de acústica no Brasil e utilizado neste trabalho, o TR é fruto de um processo estatístico. Muitas médias são necessárias para se manter a repetitividade dentro de uma faixa aceitável. Já o método da resposta impulsiva integrada é um método essencialmente determinístico: não exige médias das curvas de decaimento, mas em contrapartida exige equipamentos normalmente mais sofisticados.

5.5.1. Número de posições do microfone e da fonte sonora, e de curvas de decaimento

Teoricamente, pequenas variações na direcionalidade dos transdutores não deveriam implicar em grandes diferenças nos resultados do TR, se o campo sonoro na câmara reverberante fosse completamente difuso. Entretanto, essa condição de difusidade não é alcançada. Cabe observar que tanto o microfone quanto a fonte sonora devem ser

omnidirecionais, ou seja, ter as mesmas propriedades em todas as direções, embora não sejam estabelecidos pela norma ISO 354 os critérios para avaliação dessa característica de ambos transdutores. Teoricamente, segundo o princípio da reciprocidade, que se aplica ao campo sonoro em um ambiente, se as posições da fonte e do microfone forem permutadas, a pressão sonora deveria ser a mesma. Experimentalmente, essa expectativa não se confirma em todos os casos.

A norma ISO 354 recomenda que as posições do microfone devem estar separadas por pelo menos 1,5 m, distantes 2,0 m das posições da fonte e 1,0 m afastadas de quaisquer superfícies da câmara, da amostra ou dos difusores. Segundo o texto atual da norma ISO 354, pelo menos duas posições de fonte devem ser utilizadas. Embora nenhuma sugestão para a localização da fonte esteja disponível na ISO 354, é muito comum se instalar a fonte sonora nos cantos da sala, uma vez que nessa posição a probabilidade de inúmeros modos acústicos da sala serem excitados é maior que nas demais posições.

Considerando o volume recomendado de 200 m³ para novas câmaras reverberantes e a necessidade da instalação de pelo menos 15 m² de difusores estáticos, conforme será explanado nos tópicos seguintes, o número de posições possíveis de microfone é bastante limitado.

O número mínimo de medições (decaimentos) necessárias para cada banda de frequências é:

- a) doze decaimentos de 100 Hz a 250 Hz (por exemplo, dois para cada uma de seis combinações de fonte/microfone);
- b) nove decaimentos de 315 Hz a 800 Hz (por exemplo, três para cada uma de três combinações de fonte/microfone);
- c) seis decaimentos de 1000 Hz a 5000 Hz (por exemplo, dois para cada uma de três combinações de fonte/microfone).

5.5.2. Método da interrupção de ruído

De acordo com ARAÚJO (2002), passadas décadas da experiência realizada por Sabine, o método da interrupção do ruído ainda é o mais popular dentre todos para medição e cálculo do tempo de reverberação em câmaras ou salas reverberantes, todavia sem a necessidade de um ouvinte como fizeram nas primeiras experiências e sim através de equipamentos com recursos de processamento.

O método em sua forma simplificada exigiria somente um gerador de ruído rosa ou branco filtrado em bandas de 1/3 de oitava, um amplificador, um medidor de nível sonoro com saída AC e filtros de 1/3 de oitava, um registrador gráfico e o ajuste visual de uma reta sobre a curva de decaimento registrada em papel. É um método que exige instrumentação de (relativo) baixo custo, porém demanda muito tempo de medição, e ainda fornece desvios padrão de repetitividade insatisfatórios.

Esse aspecto insatisfatório se dá principalmente devido à sua natureza estatística. Dificilmente, se repetida a medição para uma mesma posição do microfone e fonte sonora, o ruído injetado na câmara reverberante será interrompido numa mesma amplitude e fase do som produzido.

O uso de aparelhos mais sofisticados que dispõe de recursos computacionais torna essa variação muito menos acentuada, pois esses aparelhos geram o sinal e analisam suas respostas, proporcionando um melhor controle do tempo em que o ruído deve ser interrompido, além de permitir cálculos de médias aritméticas ou de sobreposição de curvas de decaimento de maneira rápida e ágil, facilitando de maneira significativa a realização dos ensaios e obtendo resultados mais precisos, visto que inúmeras médias podem ser calculadas em um curto espaço de tempo, proporcionando ao operador que determine mais decaimentos em cada ensaio.

5.5.2.1. Excitação da sala

Um ruído de banda larga ou de banda larga filtrado em 1/1 de oitava deve ser utilizado para alimentar uma fonte composta por alto-falantes que gere ondas sonoras em várias direções. Quando for utilizado um sinal de banda larga e um analisador de tempo real, o espectro do ruído usado deve ser tal que as diferenças no nível de pressão sonora na sala devem ser menores que 6 dB nas bandas de 1/1 de oitava adjacentes.

De acordo com ARAÚJO (2002), de maneira geral, pode-se dizer que o nível de pressão sonora, ou a pressão sonora na câmara é o resultado da convolução da função de transferência entre uma certa posição dos centros acústicos da fonte e do microfone com a pressão sonora gerada pela fonte em seu centro acústico, ou seja o resultado do acoplamento entre as posições dos microfones e da própria fonte.

ARAÚJO (2002) afirma ainda que essa função de transferência muda com a introdução de uma amostra na sala, cujo coeficiente de absorção é diferente nas diversas

bandas de 1/3 de oitava do teste e, conseqüentemente, o nível sonoro nessas bandas de frequência também muda, de forma que uma fonte que atendesse as exigências de norma com a câmara sem amostra poderia deixar de atendê-las com sua presença na sala.

O sinal de excitação deve ter um tempo de duração de pelo menos metade do valor estimado para o tempo de reverberação, para que o nível de pressão sonora na sala atinja o valor de regime permanente.

5.5.2.2. Cálculo da curva de decaimento sonoro ou do tempo de reverberação médio

São sugeridos dois métodos para o cálculo do valor médio dos tempos de reverberação para cada posição do microfone: o método da curva de decaimento média, obtida segundo a Eq. 23, com o posterior ajuste de uma reta (mínimos quadrados) para o cálculo do tempo de reverberação, e o método do cálculo do tempo de reverberação médio a partir dos valores médios calculados para cada um dos grupos de decaimentos obtidos.

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad [23]$$

Na Eq. 23, $L_p(t)$ é o nível de pressão sonora no tempo t calculado para o número total N de decaimentos e $L_{pn}(t)$ é o nível de pressão sonora do n ésimo decaimento no tempo t .

A norma ISO 354 informa que em laboratórios de ensaios ambos os métodos levam ao mesmo resultado do tempo de reverberação médio da câmara reverberante. O primeiro método de cálculo foi o adotado neste trabalho, onde o tempo de reverberação médio da câmara será obtido através da curva de decaimento média das medições realizadas.

5.5.3. Avaliação das curvas de decaimento

O tempo de reverberação deve ser avaliado pela inclinação média da curva de decaimento sobre uma faixa conveniente, começando cerca de 0,1 s após a fonte sonora ser desligada, ou a partir de um nível de pressão sonora próximo de 5 decibéis abaixo daquele no início do decaimento.

A faixa usada não deve ser menor do que 20 dB, no caso do T_{20} , e 30 dB, para o T_{30} , nem tão grande que o decaimento observado não possa ser aproximado por uma linha reta, em outras palavras, o T_{20} corresponde o tempo de decaimento para 20 dB, enquanto o T_{30} equivale ao tempo de decaimento de 30 dB. O fundo dessa faixa deve ser de pelo menos 10

dB acima do nível de ruído de fundo combinado da câmara reverberante e do equipamento de gravação para cada banda de oitava.

Um decaimento pode ser descrito como aproximadamente reto se medições da inclinação de duas subseções da curva (cada uma cobrindo uma faixa de pelo menos 10 dB, com uma se estendendo para um nível de pressão sonora pelo menos 10 dB abaixo da outra) não diferem mais do que 10%.

Para cada combinação de posição de microfone e alto-falante, e para cada banda de oitava, um procedimento de média do conjunto, envolvendo a superposição de várias excitações repetidas na câmara, pode também ser usado para obter uma curva de decaimento única da qual o tempo de reverberação pode ser avaliado.

5.6. Difusidade do campo sonoro na câmara reverberante

Embora o grau de difusão sonora seja a condição mais importante a ser atendida para a validação dos resultados obtidos na medição da absorção sonora de materiais em câmaras reverberantes, sua definição, bem como métodos para sua avaliação ainda não estão satisfatoriamente consolidados.

A norma ISO 354 trata do assunto de maneira superficial em um único parágrafo, no qual se limita a estabelecer que o campo sonoro no decaimento deverá ser suficientemente difuso e que, para atender essa exigência, o uso de difusores estáticos pendurados ou placas rotativas é em geral necessário. Em um anexo da mesma norma são apresentados detalhes construtivos para difusores estáticos, além de um procedimento para sua instalação e a verificação da difusibilidade sonora do campo, tornando-se de certa forma imprescindível a utilização de difusores. Esses são normalmente associados a placas de material refletor pendurados no teto da câmara reverberante.

Cabe observar que os graus de difusão necessários para a validação da norma não são fixados quantitativamente, como inclusive os meios de verificá-los não são normalizados. A seguir serão apresentados alguns tipos de dispositivos difusores, bem como as recomendações da norma ISO 354 no que concerne à verificação da difusibilidade na câmara reverberante.

5.6.1. Dispositivos utilizados para atingir um grau de difusão sonora adequado

De acordo com ARAÚJO (2002), Sabine, em seus experimentos realizados por volta da década de 30, desenvolveu formulações para a reverberação, e estudou a influência de corpos de forma cilíndrica na difusão do campo sonoro.

Como critérios para a avaliação das várias configurações de elementos cilíndricos investigados, utilizou os desvios padrão da razão do decaimento em torno de um valor médio, resultado de um grande número de medições, estudou também a variação dos coeficientes de absorção em função de diferentes áreas de amostra, as variações na razão de decaimento causado pela posição da amostra na sala e ainda os valores medidos dos coeficientes de absorção sonoro dos materiais.

A partir desses estudos, Sabine praticamente iniciava uma série de pesquisas que continuam a se desenvolver até a atualidade para se avaliar melhor o grau de difusão e tentar uma relação com valores medidos da absorção sonora.

Diversas pesquisas têm investigado geometrias de salas e dispositivos físicos a serem utilizados em câmaras reverberantes de modo a aumentar a difusidade do campo sonoro. Popularizou-se entre os especialistas o uso de câmaras ou salas reverberantes com grandes dimensões e geometria bastante irregular. Corpos cilíndricos, difusores estáticos e rotativos vêm sendo propostos e utilizados em diferentes instalações.

A eficiência da utilização de salas com paredes não paralelas parece dificultar mais os cálculos teóricos (SCHULTZ, 1971 *apud* ARAÚJO, 2002) do que ajudar a difusão sonora na sala (DAMMIG, 1991 *apud* ARAÚJO, 2002).

A utilização de difusores rotativos (NORRIS, 1930, CHRISLER, 1934, EBBING, 1971, BODLUND, 1977 *apud* ARAÚJO, 2002) são mais eficientes nas frequências mais baixas (WARNOCK, 1983, WARNOCK, 2000 *apud* ARAÚJO, 2002) do que os difusores estáticos, mesmo os que possuem dimensões comparáveis aos comprimentos de onda nas baixas frequências.

Há vasta possibilidade de uso de difusores de diversas formas, materiais e configurações de instalação, que permite assim liberdade a cada laboratório construir seus elementos conforme sua conveniência.

5.7. Critérios da norma ISO 354

O aumento no coeficiente de absorção de uma amostra, nas frequências mais altas, é promovido pela instalação de difusores estáticos, sendo esse fenômeno estudado por vários autores (BENEDETTO *et al.*, 1981; WARNOCK, 1983; MATTOS, 1999). ARAÚJO (2002) afirma que esse fenômeno é a base do procedimento de adequação de uma câmara reverberante para medição da absorção sonora de materiais.

A norma ISO 354 permite que sejam utilizados difusores estáticos ou rotativos, desde que esses comprovem a mesma eficácia daqueles. Ambos devem ser compostos por placas com material de baixo coeficiente de absorção e com massa por unidade de área de no mínimo 5kg/m².

Os difusores estáticos, compostos de placas planas com diferentes tamanhos e áreas entre 0,8 e 3,0m², para cada lado, podem ser utilizados. Podem ainda ser ligeiramente curvos e devem ser pendurados ao teto de maneira aleatória.

A norma ISO 354 prevê que a adequação é obtida através da instalação sucessiva de difusores estáticos, em conjuntos de 5 m², até que o coeficiente de absorção sonora médio (calculado de 500 a 4000 Hz) medido para uma amostra de ensaio com coeficiente de absorção maior que 0,9 na faixa de frequências de 500 a 4000 Hz se estabilize.

6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.1. Confeção dos protótipos

Os protótipos foram confeccionados nas dimensões de 31 x 31cm, com uma espessura de 2cm, com bordas para sustentação do tipo encaixe de sobrepor com espessura e comprimento de 1 cm, para utilização caso as placas fossem suspensas. Neste caso, as placas seriam suspensas por arames galvanizados e cada placa daria sustentação em pelos menos uma de suas bordas a uma placa adjacente. O ponto de sustentação das placas se daria por intermédio de arames galvanizados introduzidos nas placas próximos aos seus vértices durante o processo de produção das mesmas.

Definidas as formas das placas fabricadas com resíduo de EVA e matriz cimentícia, a etapa seguinte seria a definição dos traços para produção das mesmas.

A definição dos traços em volume apresentou-se como melhor solução devido a variabilidade de massa unitária que o resíduo possui. Tal variação apresentada nos resíduos industriais é um fator complicador do uso do mesmo na produção de artefatos confeccionados com tal matéria-prima, desse modo fez-se também uma correção granulométrica de modo a conseguir uma menor variabilidade do material, bem como facilidade da moldagem das placas que será discutida posteriormente, produzindo protótipos com materiais sem correção e corrigidos granulometricamente.

Os compósitos produzidos foram confeccionados nos seguintes traços (aglomerante : resíduo), em volume:

- **Amostra sem correção granulométrica:**
 - 1 : 1,7
 - 1 : 2,0

- **Amostra com correção granulométrica**
 - 1 : 1,7
 - 1 : 3,4
 - 1 : 5,1
 - 1 : 6,8

Os moldes utilizados para a produção das placas estão apresentados nas figuras 14 e 15, de forma esquemática quanto a montagem dos mesmos.

Figura 14 - Vista superior e corte da fôrma dos protótipos (sem escala), medidas em centímetros

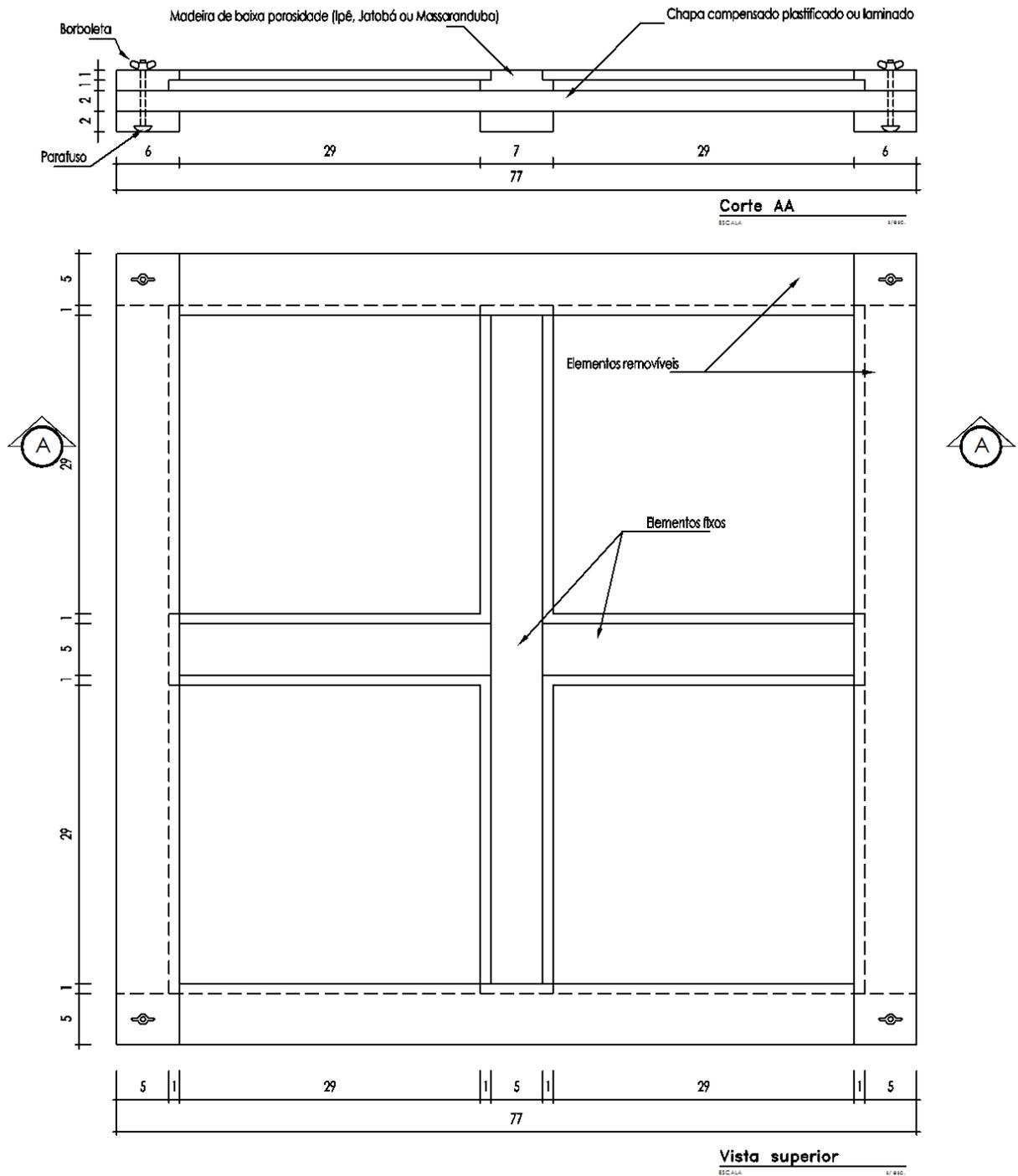
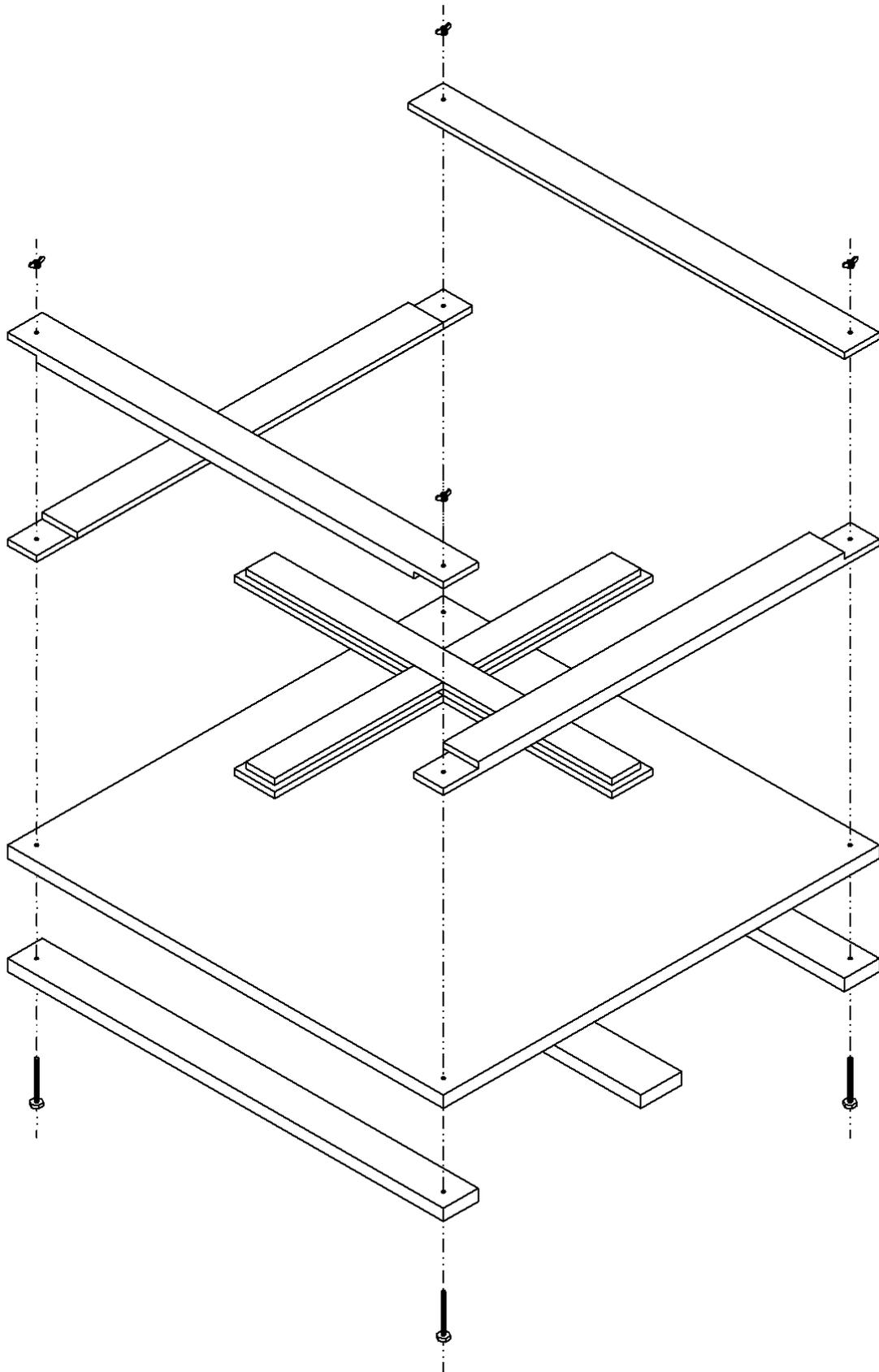


Figura 15 - Esquema de montagem dos moldes dos protótipos (sem escala)



6.1.1. Materiais utilizados

Serão apresentados a seguir os materiais utilizados na confecção das primeiras amostras dos compósitos. Foram confeccionadas placas compostas de cimento Portland e agregado leve de EVA.

6.1.1.1. Cimento Portland

Utilizou-se cimento Portland tipo CII-Z-32, sendo esse atualmente um dos mais utilizados na região.

6.1.1.2. Agregados leves de EVA

Os resíduos de EVA são oriundos de uma indústria calçadista da cidade de Campina Grande-PB, que foram remetidos à Universidade Federal da Paraíba já triturados e identificados com etiquetas que correspondendo à abertura da peneira utilizada no moinho de facas, que determina a granulometria do agregado.

O agregado de EVA foi submetido a ensaios de caracterização física; foram eles:

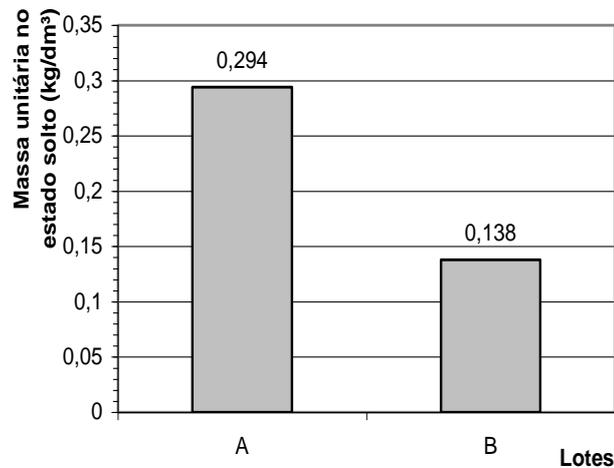
1. Massa unitária no estado solto (NBR 7251/1982);
2. Determinação da composição granulométrica (NBR 7217/1987).

Sendo ambos os procedimentos determinados para aplicação com agregados naturais.

Foram coletados dois lotes (lotes A e B) contendo agregados leves de EVA que foram ensaiados conforme estes procedimentos.

Os resultados dos ensaios de massa unitária do agregado leve estão apresentados na Figura 16, sendo esses dois lotes suficientes para produção de todas as amostras confeccionadas para o estudo aqui apresentado.

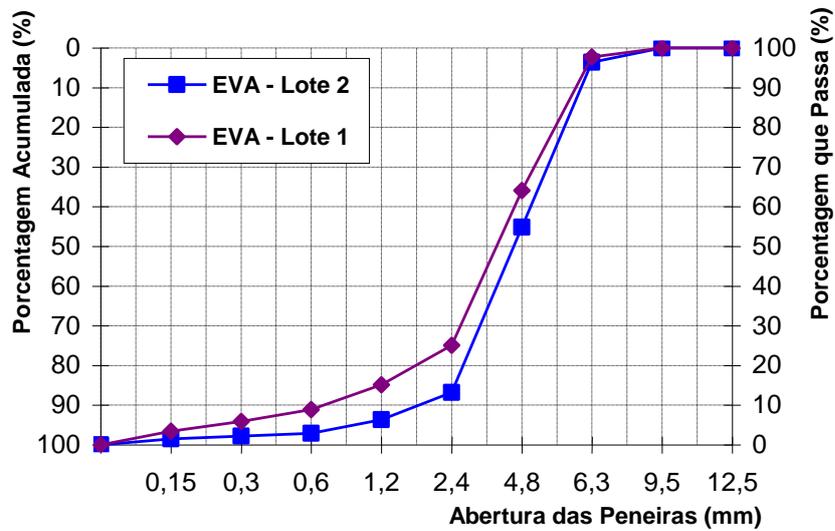
Figura 16 - Massa unitária no estado solto do agregado de EVA



Observe que a massa unitária dos dois lotes apresentou uma variação de cerca de 113%, sendo esse um fator determinante na definição do traço ser dado em volume, pois caso fosse utilizado o traço em peso, o mesmo iria apresentar uma variação na sua constituição, sendo negativa para o estudo em questão, uma vez que objetivasse verificar a influência dessa dosagem no coeficiente de absorção sonora. Se a dosagem fosse dada em peso, caso se produzisse dois lotes de placas com mesmo traço em peso, porém utilizando agregados dos dois lotes, esses iriam se apresentar completamente distintos, pois sua composição em volume seria dada de forma que uma seria o dobro da outra.

Quanto à caracterização granulométrica, tal variação não ocorre e as curvas granulométricas se apresentaram semelhantes, uma das razões dessa composição granulométrica ser tão próxima e resultado do processo de trituração do mesmo, pois a abertura da peneira na saída do equipamento triturador é quem definirá tal granulometria da amostra produzida. A Figura 17 apresenta as curvas granulométricas obtidas dos dois lotes de agregado de EVA.

Figura 17 - Curva granulométrica dos agregados de EVA



6.1.2. Preparação dos compósitos leves

6.1.2.1. Pré-molhagem do agregado de EVA

Por se tratar de um material de baixa densidade e com característica esponjosa, ao entrar em contato com a água da mistura, o agregado de EVA tende a absorver certa quantidade de água e isto poderá prejudicar a trabalhabilidade da mistura e, até mesmo, acarretar em uma redução de água disponível para reagir com o cimento. Por isto, o agregado de EVA foi imerso em água antes da preparação da mistura. Para tal, o agregado foi colocado em balde com água, utilizando-se uma tela de nylon como barreira para garantir sua total imersão, impedindo que o mesmo flutue na superfície da água, conforme Figura 18.

Figura 18 - Detalhe do recipiente utilizado na pré-molhagem do agregado de EVA



O tempo de imersão foi determinado em 15 minutos. Segundo BEZERRA (2002), este tempo é necessário para garantir uma absorção de cerca de 35%. O fator água/aglomerante adotado foi de 0,50.

6.1.2.2. Processo de mistura

A mistura foi executada em misturador de argamassa do tipo planetário, o processo é iniciado depositando o agregado de EVA com pré-molhagem, em seguida o cimento à mistura na razão de 1/2 da quantidade total de cimento, de modo a tornar a pasta mais consistente, e em seguida adicionando 2/3 do volume de água. Logo em seguida colocou-se o restante do cimento, e, após obter novamente uma mistura de consistência seca, adicionou o 1/3 restante da água, misturando agora por um período de tempo de 5 minutos.

As Figuras 19 a 22 apresentam algumas das etapas realizadas durante o processo de mistura dos componentes.

Figura 19 - Colocação do agregado de EVA no misturador



Figura 20 - Pré-mistura do agregado e 1/2 do aglomerante



Figura 21- Adição do 1/3 restante de água



Figura 22 - Argamassa pronta para moldagem dos compósitos



6.1.2.3. Moldagem das placas

A etapa de moldagem das placas consistiu na prévia aplicação de aditivo desmoldante no molde de madeira, de modo a permitir a fácil desmoldagem do compósito.

- O processo de moldagem em si consistiu nas seguintes etapas:
- Colocação de argamassa sobre a fôrma;
- Espalhamento da argamassa com auxílio de colher de pedreiro;
- Leve compactação nas bordas a fim de se garantir a perfeita moldagem dos encaixes das placas;
- Sarrafeamento com régua de alumínio ou madeira sobre a placa, acompanhado de desempeno da superfície a fim de corrigir irregularidades;
- Após 24h da moldagem é executado o processo de desmoldagem e em seguida as placas são levadas para os tanques de cura, onde foram curadas pelo processo de cura por imersão pelo período de 7 dias.

As Figuras 23 a 26 apresentam algumas das etapas executadas durante o processo de fabricação das placas.

Figura 23 - Molde após aplicação de aditivo desmoldante



Figura 24 - Colocação da argamassa sobre o molde



Figura 25 - Placas moldadas



Figura 26 - Processo de desmoldagem



Confeccionadas as primeiras placas com o agregado de EVA sem correção granulométrica, observou-se uma dificuldade de moldagem dos encaixes das placas, uma vez que o agregado apresentava dimensão máxima característica de 6,3 mm. Fez-se então uma correção granulométrica utilizando os seguintes critérios:

- Dimensão máxima característica inferior a 2/4 da menor espessura da placa;
- Menor dimensão do agregado de 1,2mm, tomando-se este valor devido ao fato de quando da moldagem dos primeiros corpos de provas, as partículas de dimensão inferior a 1,2 mm ficavam em suspensão no processo de mistura, não sendo envolvidas pelo aglomerante, e conseqüentemente as placas apresentando desagregação deste material quando no estado seco, após a moldagem

Deste modo, fez-se então o beneficiamento do agregado de EVA de modo a confeccionar placas com os traços citados anteriormente, utilizando o mesmo processo de confecção dos protótipos, desprezando-se a fração inferior a 1,2 mm e superior a 4,8 mm, tendo assim como dimensão máxima característica de 4,8mm. Todas as placas utilizadas nos ensaios em câmara reverberante desta pesquisa foram confeccionadas com essa correção granulométrica.

6.2. Parâmetros investigados nas placas

6.2.1. Índice de vazios

A norma NBR 9778:1987 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica* – define o índice de vazios, I_v , como sendo a relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, sendo calculada pela Eq. 24 a seguir:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad [24]$$

Na Eq. 24, M_{sat} é a massa do corpo-de-prova saturado em água com superfície seca, M_s é massa do corpo de prova seco em estufa e M_i a massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água.

De acordo com a norma NBR 9778, a saturação do corpo-de-prova foi realizada na seguinte condição:

- Imersão em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

A aparelhagem utilizada para realização do ensaio foi a seguinte:

- Balança mecânica – sensível a 0,025% da massa das amostras, que foi adaptada de modo a realizar as pesagens dos corpos-de-prova submersos;
- Recipientes para imersão – foram utilizados tanques de cura de corpo-de-prova para realizar a imersão da amostra, e quando realizada a pesagem submersa as amostras foram imersas em baldes plásticos com altura de aproximadamente 60 cm;
- Estufa – com dimensões internas apropriadas para armazenar as amostras de argamassas e de concreto à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.

As amostras foram obtidas das placas confeccionadas pelos procedimentos anteriormente descritos, em número de quatro amostras, conforme preconizado em norma, com volume de 1800 cm³, isento de óleo ou outros materiais aderidos na moldagem, atendendo assim as condições determinadas em norma.

O ensaio é executado seguindo os seguintes procedimentos:

- Secagem em estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$
 - Determinar a massa da amostra ao ar e mantê-la em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Determinar a massa da amostra após permanência na estufa por 24 h, 48 h e 72 h.
 - Resfriar a amostra ao ar seco à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, de preferência em dessecador, e determinar a massa.
 - Para referência, registrar a massa da amostra após 72 h de permanência na estufa e informar complementarmente as medidas intermediárias das massas.
 - Em casos especiais, e mediante solicitação expressa, a amostra pode permanecer na estufa até que duas pesagens sucessivas, com intervalo de 24 h, não difiram em mais de 0,5% da menor massa.
- Saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$
 - Completada a secagem em estufa e determinada a massa, proceder à imersão da amostra em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, durante 72

h, onde a amostra deve ser mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 h e 2/3 nas 4 h subseqüentes, sendo completamente imerso nas 64 h restantes.

- Determinar a massa, decorridas 24 h, 48 h e 72 h de imersão. As determinações devem ser efetuadas após enxugar-se a superfície da amostra com toalha absorvente.
 - Para referência, registrar a massa da amostra após 72 h de imersão em água e informar complementarmente as medidas intermediárias das massas.
 - Em casos especiais, e mediante solicitação expressa, pode a amostra, em intervalos de 24 h, permanecer imersa em água até que duas pesagens sucessivas, efetuadas, não difiram em mais de 0,5% da menor massa.
- Massa da amostra imersa em água
 - Após completar a saturação proceder à pesagem em balança, conforme citada anteriormente, anotando a massa da amostra imersa em água.

Findo esses procedimentos realizar os cálculos conforme Eq. 4.2-1, aplicando a média aritmética das amostras ensaiadas de modo a obter o valor do índice de vazios.

6.2.2. Resistividade ao fluxo de ar

A resistividade ao fluxo de ar é conforme definida anteriormente é a dada como sendo a relação entre a diferença de pressão constante Δp através de uma placa, em N/m², e a velocidade do fluxo de ar normal à superfície da amostra u' , em m/s, e a espessura do material b , em m, conforme mostrado na Eq. 25, a seguir:

$$R = \frac{\Delta p}{u' b} \quad [25]$$

De maneira a se obter tal parâmetro, adaptou-se o procedimento determinado na norma NBR 8517:2003 – *Espuma flexível de poliuretano – Determinação da passagem de ar através da espuma* – sendo esse o procedimento disponível nas normas nacionais.

Essa norma descreve o método para determinação da passagem de ar através das espumas flexíveis de poliuretano. A facilidade com que o ar passa através da espuma pode ser empregada como uma medida indireta de certas características de estrutura celular da espuma. Porém, para a aplicação que está sendo realizada neste trabalho, a mesma apresenta-se como solução, pois o princípio dessa norma consiste em se sujeitar um corpo-de-prova de espuma flexível a um diferencial de pressão de ar constante e pré-especificada. A taxa de fluxo de ar necessária para manter este diferencial de pressão é dada como valor de passagem de ar, em centímetros cúbicos por segundo, estando tal procedimento relacionado com a definição da resistividade ao fluxo de ar citado anteriormente.

A aparelhagem utilizada em tal procedimento consiste em:

- Máquina de ensaio com as seguintes características:
 - a) deve conter uma abertura onde é colocado o corpo-de-prova. A norma preconiza que tal amostra deve ter as dimensões de 50 mm x 50 mm x 25 mm, com precisão de $\pm 0,1$ mm para todas as dimensões, porém utilizou-se amostra formadas por placas confeccionadas de acordo com o item 6.1.2. Foi utilizado um anteparo de suporte das amostras na máquina com abertura inferior às dimensões da amostra, sendo esta com dimensões de 280 mm x 280mm e espessura de 20 mm. Neste caso, o equipamento utilizado para tal procedimento foi o túnel de vento do laboratório de Hidráulica da Universidade Federal da Paraíba, onde foi instalada tal estrutura de suporte, conforme Figuras 28 e 29;
 - b) Utilizou-se como dispositivo capaz de registrar continuamente o diferencial de pressão um manômetro de água, com precisão de leitura de 10 Pa, conforme mostrado na Figura 28;
 - c) Como dispositivo capaz de indicar a velocidade do fluxo de ar, através da amostra, utilizou-se um anemômetro fio quente, com precisão de leitura de 0,03 m/s.
 - d) O túnel de vento é acionado de modo a permitir uma pressão uniforme e constante na amostra de ensaio.

O procedimento para realização do ensaio consiste nos seguintes procedimentos:

- Devem ser ensaiados no mínimo três corpos-de-prova.
- Colocar o corpo-de-prova na cavidade de ensaio do aparelho. Assegurar-se de que as paredes da amostra estejam em contato com as da cavidade, de modo a proporcionar vedação na interface. Como solução complementar vedou-se as bordas da amostra e da estrutura de suporte das mesmas com massa plástica.
- Regular o fluxo de ar no túnel de vento em dispositivo específico para tal procedimento, a fim de se obter um diferencial de pressão de 125 ± 1 Pa. Esse diferencial de pressão foi determinado através de uma tomada de ar disposta a montante do local onde a amostra estava disposta e a pressão atmosférica que se apresentava à jusante da placa ensaiada. A medição da velocidade foi realizada a uma distância de 14 cm da placa à jusante, de modo a diminuir a influência da turbulência do fluxo de ar que passa na amostra.
- Após 10s de estabilização da pressão diferencial, fazer a leitura na escala de fluxo de ar.
- O valor da passagem de ar é medido através de um fator de correção dado pelo sistema de medição utilizado, conforme equação 26 a seguir:

$$V_{act} = V_{std} \left[\frac{460 + T}{460 + 70} \right] \times \frac{14,7}{P} \quad [26]$$

Na Eq. 26, V_{act} é a velocidade real, V_{std} a velocidade medida no equipamento, T a temperatura do ambiente, em Fahrenheit, e P a pressão ambiente, em psia.

A medição da velocidade do fluxo de ar que atravessa a amostra foi realizada em 9 pontos espaçados em 7 cm, conforme ilustra a Figura 27, de modo que o valor da velocidade do ar normal a superfície, u' , foi obtido pelo somatório dos fluxos de ar com relação às respectivas áreas de influência dos pontos medidos (vazão), ver Tabela 11, dividido pela área total da amostra.

Figura 27 – Desenho esquemático dos pontos de medição de velocidade do fluxo e respectivas áreas de influência (medidas em centímetros)

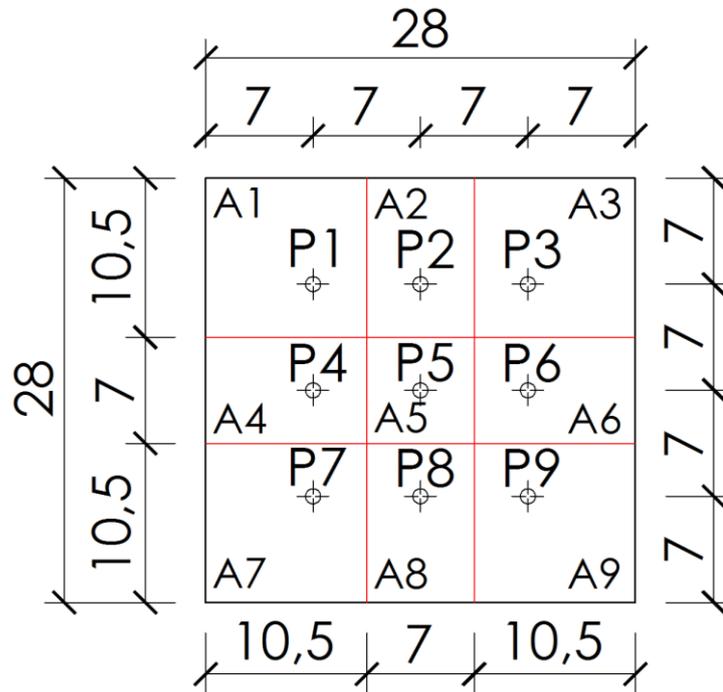


Tabela 11 – Área de influência dos pontos de medição da velocidade do fluxo de ar e área total da amostra

Ponto de medição	Área influência	Área de influência (cm ²)
P1	A1	110,25
P2	A2	73,50
P3	A3	110,25
P4	A4	73,50
P5	A5	49,00
P6	A6	73,50
P7	A7	110,25
P8	A8	73,50
P9	A9	110,25
TOTAL		784,00

O sistema de aparelhagem utilizado para realizar as medições das velocidades dos fluxo de ar é apresentado nas Figuras 28 a 30, a seguir:

Figura 28 - Equipamentos utilizados na medição do fluxo de ar

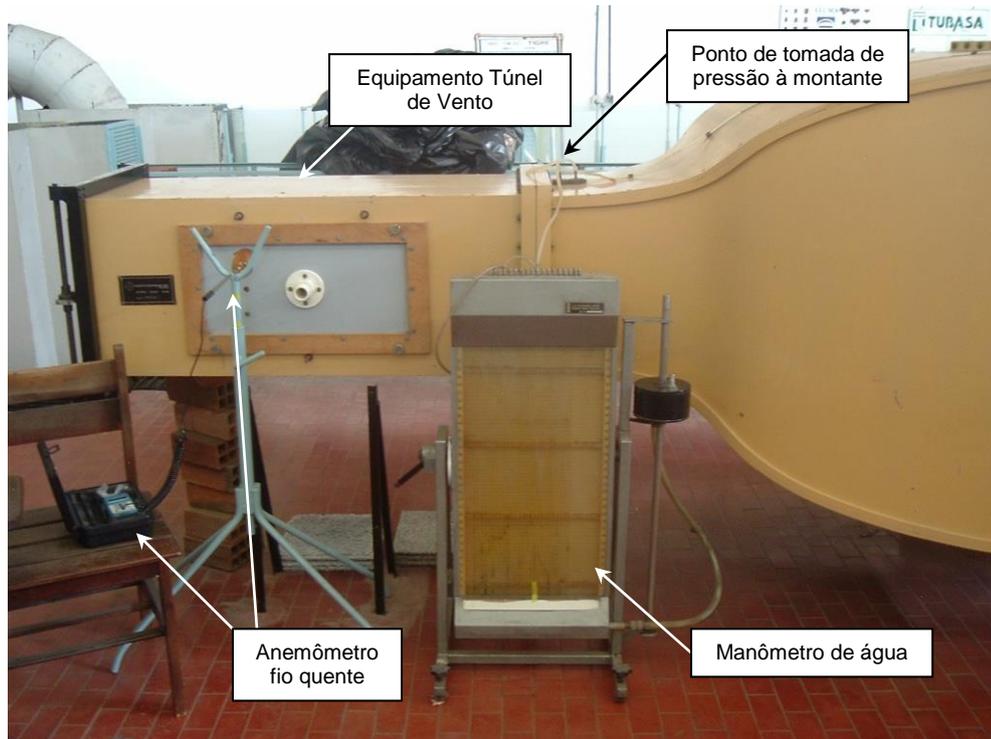


Figura 29 - Amostra instalada e pronta para medição do fluxo de ar

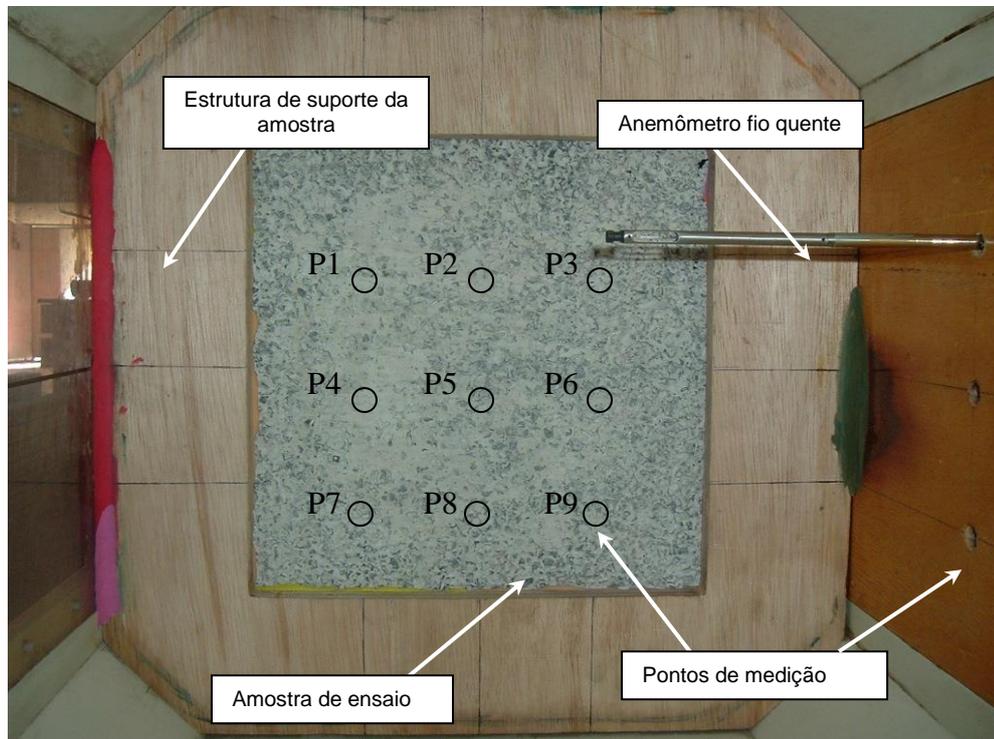
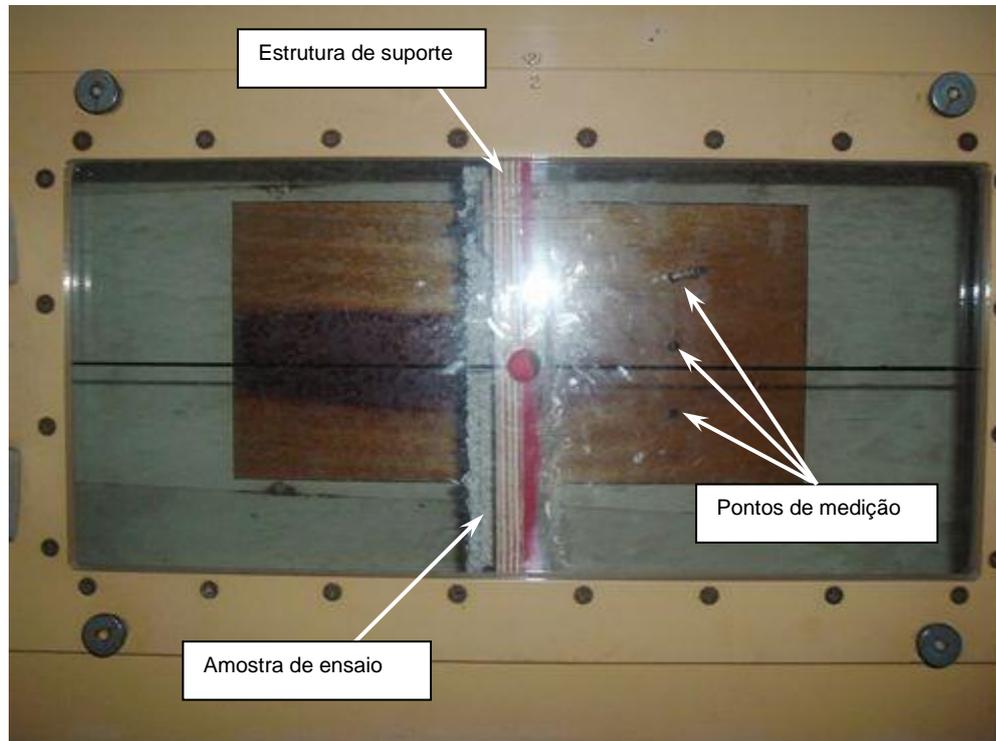


Figura 30 - Esquema de montagem da amostra no túnel de vento utilizado para medição do fluxo de ar



O resultado expresso deve ser a média aritmética dos três ensaios efetuados, que devem ser substituídos na Eq. 26 e expressos na unidade definida como Rayl/m (ou Ns/m^4).

6.2.2.1. Determinação do coeficiente de absorção acústica a partir da resistividade ao fluxo de ar

GERGES (1992) afirma que para os materiais de alta porosidade a relação entre o coeficiente de absorção acústica α_n , para onda incidente normal, e a resistividade ao fluxo, é dada pela Eq. 1.1-2 abaixo:

$$\alpha_n = \frac{4k}{(k+1)^2 + \psi^2} \quad [27]$$

Onde:

$$k = 1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_0 f}{R} \right)^{-0,754} \quad [28]$$

e

$$\psi = -0,0870 \left(\frac{\rho_0 f}{R} \right)^{-0,732} \quad [29]$$

Sendo f a frequência da onda sonora expressa em Hz e ρ_0 a densidade do ar em kg/m³.

6.2.3. Determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante

A norma internacional ISO 354:2003 – *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room* - descreve o método de ensaio para determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante, além de relacionar as condições que devem ser atendidas para a realização do mesmo.

As amostras utilizadas nos ensaios foram placas compostas de matriz cimentícia e resíduo de EVA, confeccionadas conforme procedimento descrito anteriormente, utilizando-se 110 placas de dimensões 31 x 31 cm, nos traços 1:1,7 e 1:3,4 (aglomerante:agregado), em volume. Devido ao fato de ser necessário uma extensa área de amostra foram selecionados esses dois traços baseados nos resultados obtidos nos ensaios do índice de vazios e resistividade ao fluxo de ar, que serão apresentados e discutidos posteriormente neste trabalho. Quando preparadas essas amostras resultaram em uma área de 9,96 m². Por outro lado, uma amostra de referência de espuma flexível de poliuretano poliéster expandido modelo SONIQUE CLASSIC 50C, utilizando-se 30 placas de dimensões 62,5 x 62,5 cm, resultaram em uma área de aproximadamente 11,72 m², sendo esse material imprescindível para calibração da câmara reverberante no que se refere à difusidade do campo sonoro em seu interior, procedimento esse que será apresentado adiante. As amostras, foram dispostas no interior da câmara conforme as Figuras 31 e 32, atendendo as recomendações descritas anteriormente.

Figura 31 - Disposição da amostra de placas de compostas de cimento e EVA na câmara reverberante

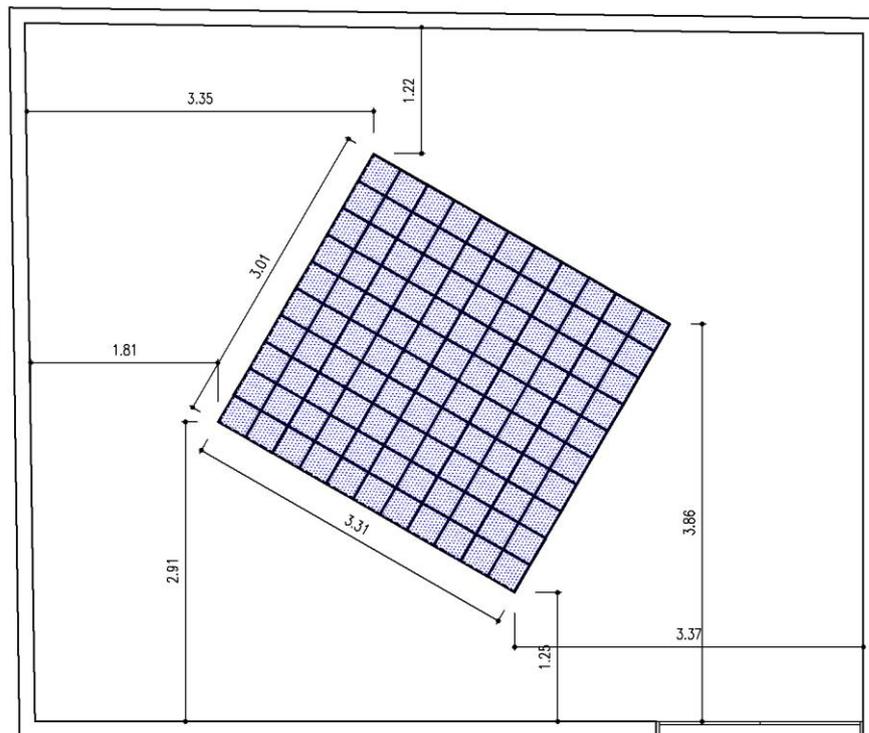
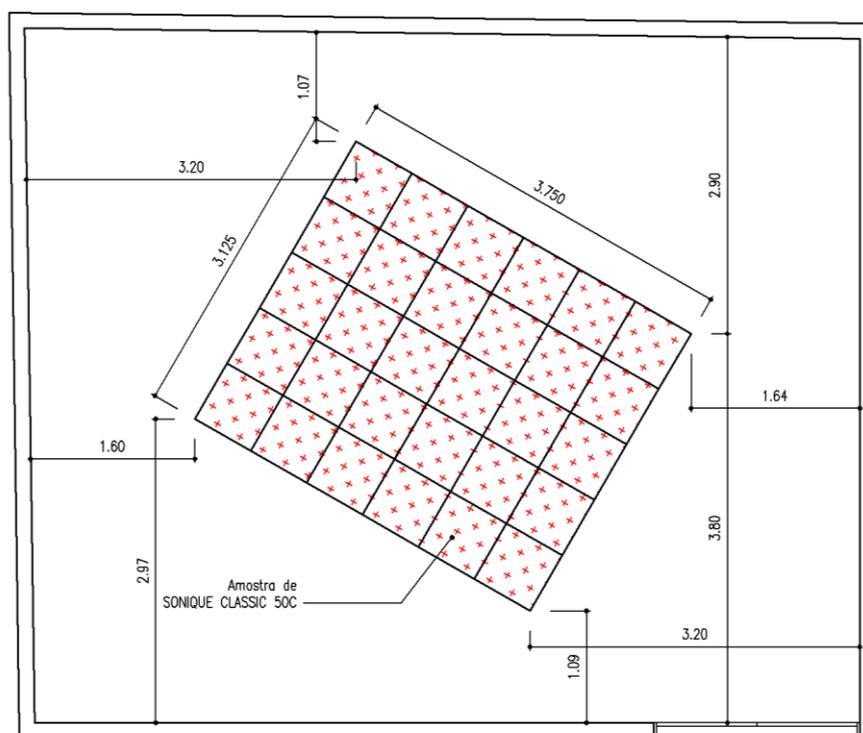


Figura 32 - Disposição da amostra de SONIQUE CLASSIC 50C na câmara reverberante

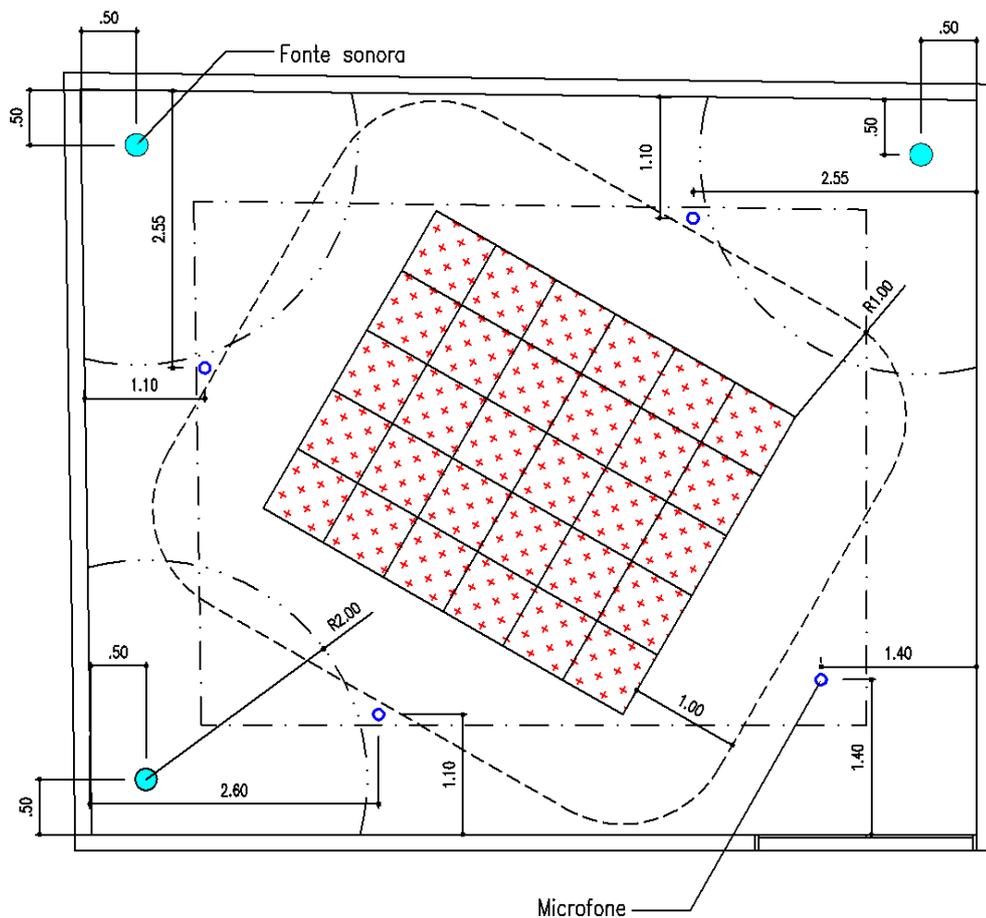


Definidas as posições onde foram colocadas as amostras, partiu-se para a locação das posições das fontes geradoras do ruído e dos microfones receptores. A norma ISO 354 recomenda que as posições do microfone devem estar separadas por pelo menos 1,5 m, distantes 2,0 m das posições da fonte e 1,0 m afastadas de quaisquer superfícies da câmara, da amostra ou dos difusores. Foram utilizadas três posições de fonte e quatro posições de microfone, medindo-se dois decaimentos em cada posição do microfone, totalizando vinte e quatro decaimentos em cada ciclo de medição do tempo de reverberação. Atendendo a essas recomendações os mesmos foram dispostos conforme Figuras 33, tomando-se por base a configuração que continha a amostra de SONIQUE CLASSIC 50C, por esta ocupar uma área maior na câmara e dessa forma compor o cenário mais desfavorável.

Figura 33 - Posição da fonte sonora e microfone no interior da câmara reverberante

LEGENDA:

- Fonte sonora
- Microfone
- Área de influência da amostra (1m)
- · - · Área de influência da fonte (2m)
- - - - Área de influência das paredes da câmara (1m)
-  Amostra SONIQUE CLASSIC 50C

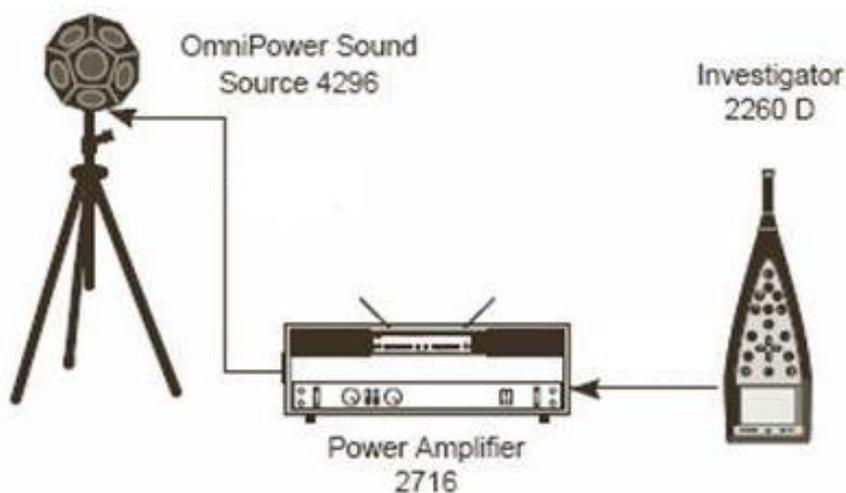


Devido às pequenas dimensões da câmara, não há muitas alternativas para as posições da fonte sonora e dos microfones, havendo assim certa limitação quanto à disposição dos mesmos, tomando-se por base as recomendações da norma.

O equipamento de medição utilizado foi INVESTIGATOR 2260 D, fabricado pela Brüel & Kjaer, o qual além de gerar o sinal (ruído) de banda larga, também funciona como receptor e analisador do som recebido, determinando o tempo de reverberação e as curvas de decaimento do ruído em cada faixa de frequência pré-determinada pelo usuário.

Para gerar o campo sonoro no interior do ambiente o INVESTIGATOR 2260 D, gerador do sinal de banda larga (ruído rosa), é ligado a um amplificador de potência, POWER AMPLIFIER 2716 fabricado pela Brüel & Kjaer, e esse é ligado a um sistema de alto falantes do tipo omnidirecional, OMNIPOWER SOUND SOURCE 4296, também de fabricação da Brüel & Kjaer, que emite o sinal que foi gerado e amplificado pelos outros dois equipamentos. Esse esquema de ligação é apresentado na Figura 34 a seguir.

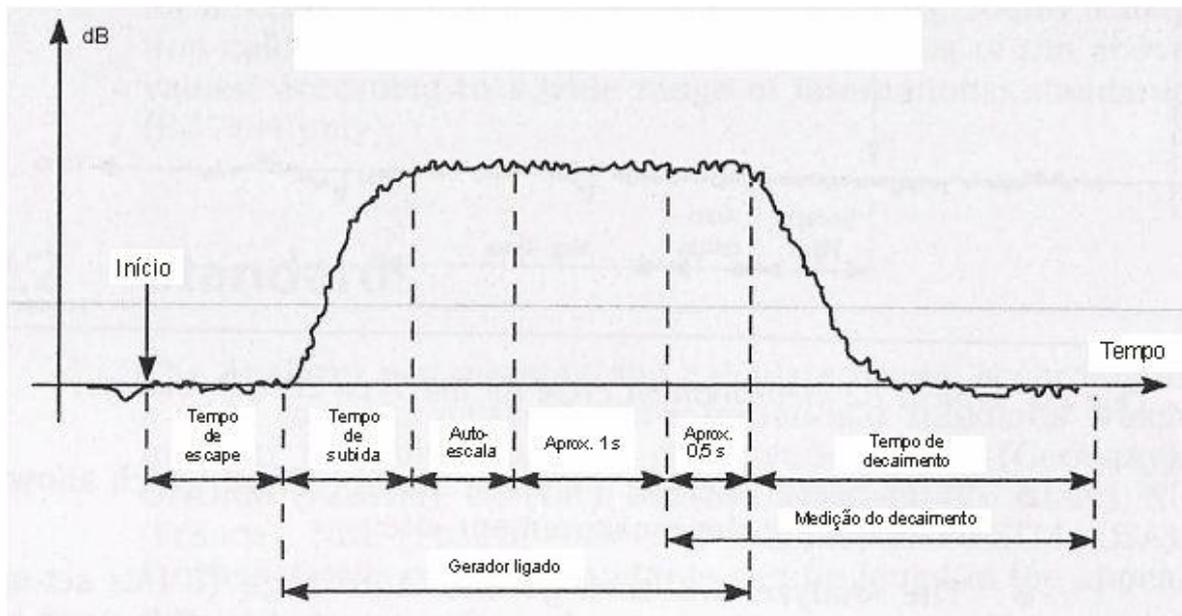
Figura 34 - Esquema de ligação dos equipamentos utilizados na câmara reverberante
(Adaptado Brüel & Kjaer, 2003)



O tempo de reverberação, conforme definido anteriormente, é o tempo necessário para que ocorra um decaimento de 60 dB. Na prática, isso é difícil de ser medido, então decaimentos de 20 dB e 30dB, conhecidos como T_{20} e T_{30} , respectivamente, são usados e extrapolados para encontrar o tempo de decaimento de 60 dB.

O método utilizado nas medições foi o do ruído interrompido, que tem seu ciclo representado esquematicamente na Figura 35 a seguir.

Figura 35 - Ciclo de medição típica do tempo de reverberação para o método do ruído interrompido (Adaptado de Brüel e Kjaer, 2003)



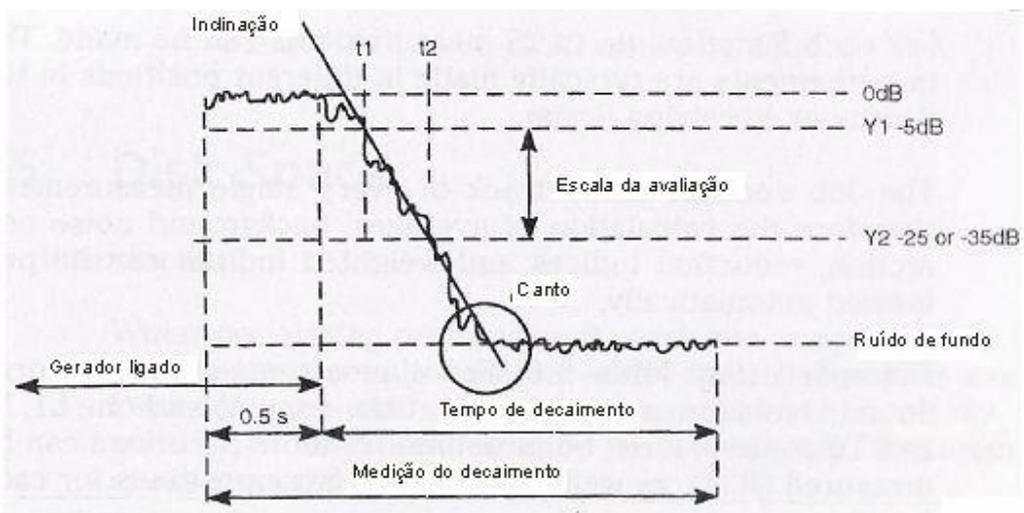
Os estágios representados na Figura 35, correspondem aos seguintes procedimentos:

- Após iniciado o ensaio, existe um tempo de escape, sendo esse destinado a saída do operador do equipamento do ambiente onde está sendo realizado o ensaio. Configurou-se esse tempo como sendo de 25 segundos, sendo esse suficiente para que o operador do ensaio saísse do interior da câmara e fechasse a porta da mesma.
- O tempo de subida é o tempo em que o gerador de ruído é acionado após o tempo de escape e consiste em elevar o nível sonoro do ambiente até que um estado constante seja alcançado, sendo esse definido em conjunto com o amplificador usado no sistema e o gerador do sinal. Esse tempo foi configurado como sendo de 10 segundos, suficiente para que houvesse uma distribuição constante do nível de pressão sonora nas diversas faixas de frequência.
- O analisador vai então para o estado determinado auto-escala, onde é detectado o nível usado para escolher a escala mais conveniente para o ensaio, porém essa opção pode ser desabilitada e não há alteração nos resultados obtidos, onde prevalecerá então a etapa de tempo de subida.

- O nível é então medido aproximadamente 1 segundo após a etapa anterior para identificar o nível de referência 0 dB.
- O processo de medição do decaimento então é iniciado.
- Após aproximadamente 0,5 segundos o gerador de ruído é desligado e o tempo de decaimento é iniciado.
- A medição do decaimento termina após o fim do tempo de decaimento escolhido na opção do analisador do sinal, que foi utilizado como sendo de 15 segundos.

A avaliação do tempo de decaimento é dada conforme o esquema representado na Figura 36 a seguir, que faz parte do ciclo mostrado na Figura 35.

Figura 36 - Esquema e definições utilizadas no cálculo do tempo de reverberação



Fonte: Brüel & Kjaer (2003)

O tempo de reverberação é determinado pelo intervalo de tempo entre t_1 e t_2 , sendo t_1 referente ao nível sonoro -5 dB do nível de referência 0 dB, definido anteriormente, e t_2 correspondente ao nível sonoro -25 dB ou -35 dB do nível de referência, referindo-se ao T_{20} e T_{30} , respectivamente.

O equipamento de medição requer que o nível de ruído de fundo fique abaixo do nível de auto-escala em no mínimo -35 dB e -45 dB, para os tempos T_{20} e T_{30} , respectivamente. A norma ISO 354:2003 também requer essa condição, porém para efeito de cálculo do TR deve ser considerado o T_{30} . Caso não seja possível obter tal decaimento, deve-se então adotar o T_{20} .

A verificação da difusividade da câmara é uma exigência normativa, que objetiva uma homogeneidade nos resultados obtidos nas mais diversas câmaras reverberantes. O procedimento para realizar tal verificação consiste nos seguintes procedimentos:

- a) Selecionar uma amostra de ensaio adequada, isto é, com 5 a 10 cm de espessura produzida com material absorvedor poroso homogêneo, que em condições ótimas tem um coeficiente de absorção sonora maior que 0,9 nas faixas de frequências entre 500 Hz e 4000 Hz. Utilizou-se na presente pesquisa material de fabricação industrial que se trata de uma espuma flexível de poliuretano poliéster expandido modelo SONIQUE CLASSIC 50C, com 5cm de espessura. Essa amostra atende a todas as recomendações citadas anteriormente.
- b) Deve-se montar a amostra na câmara reverberante, tomando-se os procedimentos que já foram citados anteriormente.
- c) Faz-se então o ensaio da absorção sonora da seguinte forma:
 - a. sem difusores e sem amostra;
 - b. sem difusores e com amostra;
 - c. com um pequeno número de difusores estacionários (5 m² de área), instalados aleatoriamente no interior da câmara;
 - d. com quantidade crescentes de difusores, aumentando em 5m² por vez.
- d) Para cada conjunto de medições, calcula-se a média dos coeficientes de absorção sonora das faixas entre 500 e 4000 Hz., representando graficamente esses valores em função do número de difusores usados em cada caso.
- e) Tal coeficiente de absorção sonora que se aproximar de um máximo e permanece constante com o aumento de difusores. Dessa forma o número ótimo de difusores corresponde à quantidade em que esse coeficiente de absorção constante é atingido.

De modo a se obter tal difusão do campo sonoro no interior da câmara reverberante, foram utilizados difusores fabricados em chapas metálicas de aço galvanizado, levemente curvadas e fixadas através de soldas a tubos metálicos, com área superficial, de cada lado do difusor, de 1,2, 1,4 e 2,4 m², que, quando montados em conjunto resultam em uma área

superficial de 5,0 m² em cada lado dos difusores. As dimensões e formas dos difusores estão apresentadas nas Figuras 37 a 39 a seguir.

Figura 37 - – Planta esquemática dos difusores estáticos nas dimensões 1,20 x 1,00m (medidas em metros)

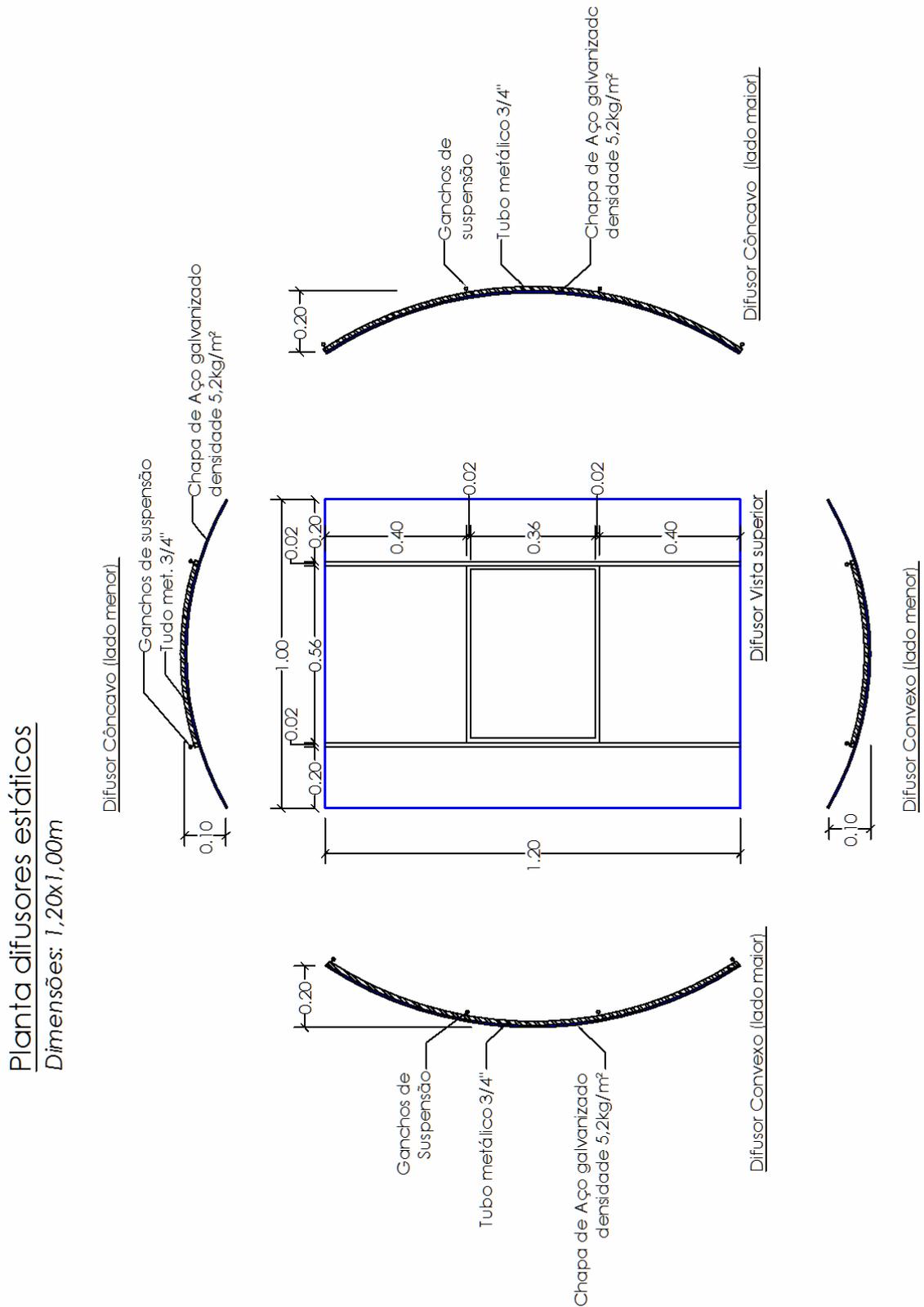


Figura 38 - Planta esquemática dos difusores estáticos nas dimensões 1,40 x 1,00m (medidas em metros)

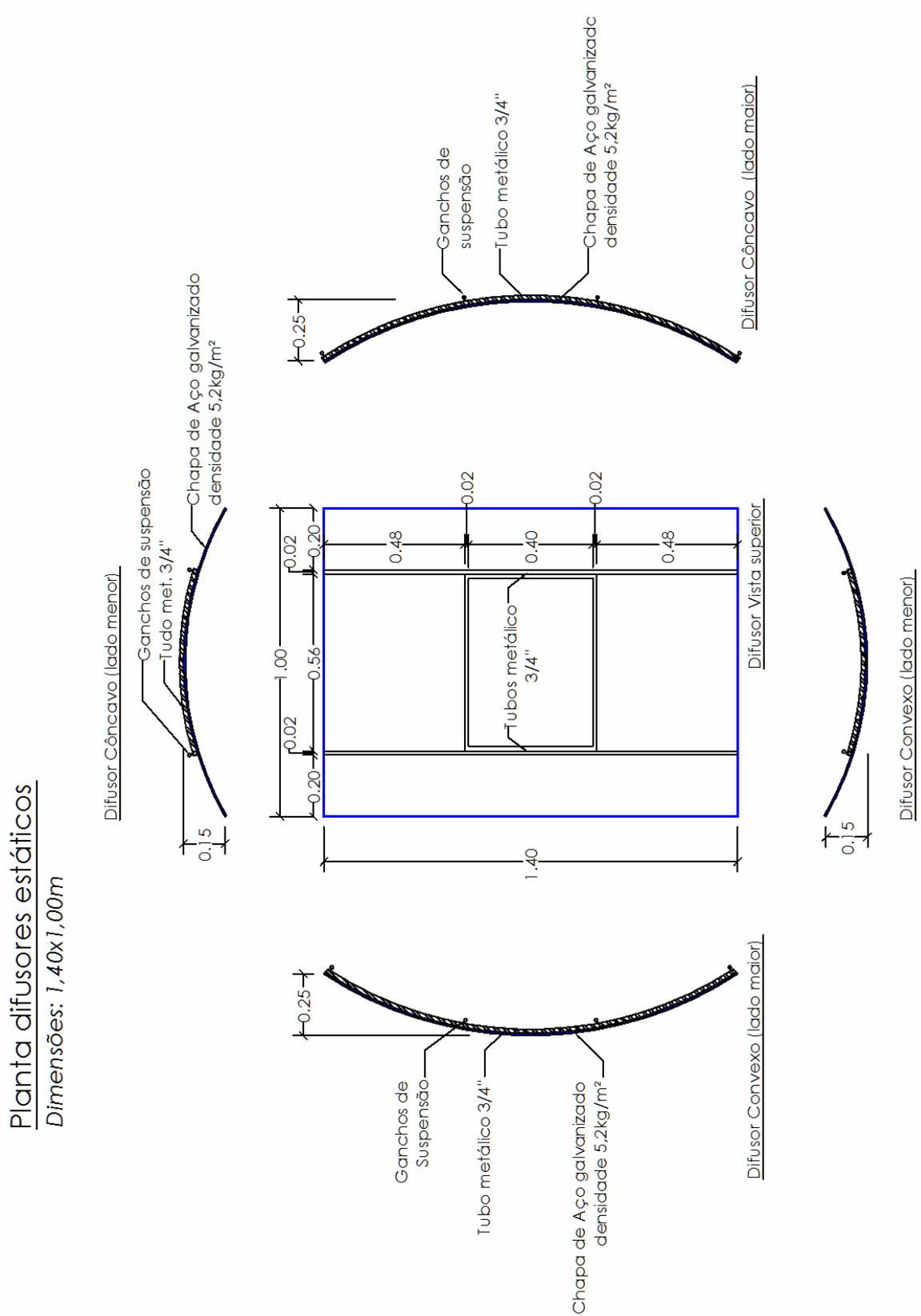
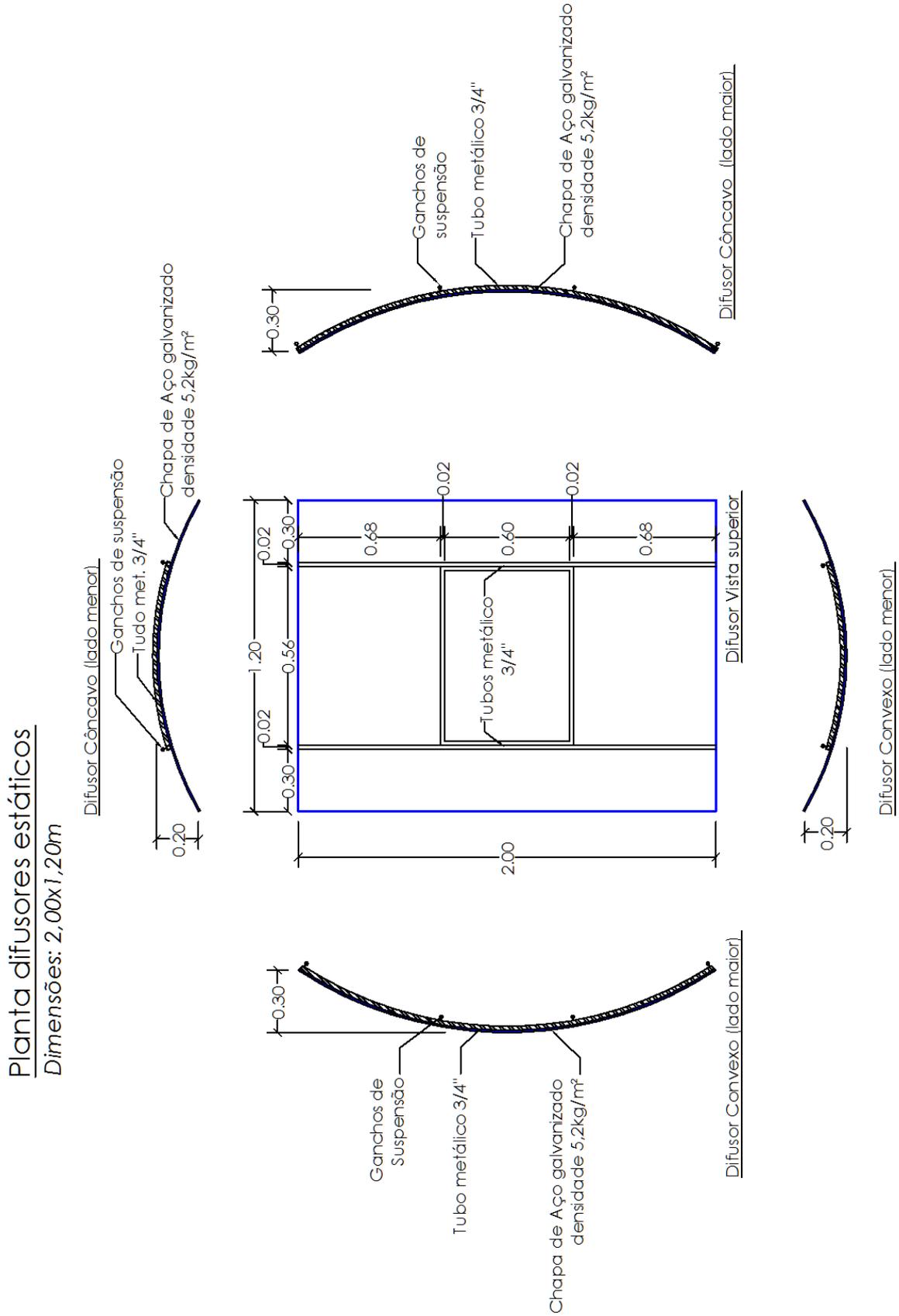


Figura 39 - Planta difusores estáticos nas dimensões 2,00 x 1,20m (medidas em metros)



A fim de se obter a calibração da câmara quanto à difusão do campo sonoro em seu interior, realizou-se o ensaio sem amostra e sem difusores de modo a se obter o tempo de referência para o cálculo do coeficiente de absorção sonora do material que seria posteriormente ensaiado. Neste momento foram medidas as condições ambientais, temperatura e umidade, de modo a verificar durante todo o procedimento de ensaio as variações ocorridas que podem levar a uma correção nos resultados, casos as mesmas não fiquem dentro dos limites expressos na Tabela 10. A Figura 40 apresenta o aparelho, da marca Brunton, que mede pressão atmosférica, umidade relativa do ar e temperatura ambiente, sendo este equipamento utilizado para fazer tais medições. Observar na parte inferior os valores de umidade relativa e temperatura do ar medidos, estes necessários ao ensaio realizado.

Figura 40 - Aparelho de medição de condições climatológicas



Após a medição do tempo de referência da câmara vazia e sem difusores, realizou-se a etapa seguinte, que foi a instalação da amostra do material absorvente de referência com a câmara sem difusores, e realizou-se nova medição do tempo de reverberação da câmara nessa configuração. As Figuras 41 e 42 apresentam a montagem da amostra no interior da câmara e as Figuras 43 e 44 mostram a configuração da câmara sem os difusores.

Figura 41 - Montagem da amostra de referência no interior da câmara



Figura 42 - Detalhe borda da amostra protegida com material reflexivo (alumínio)

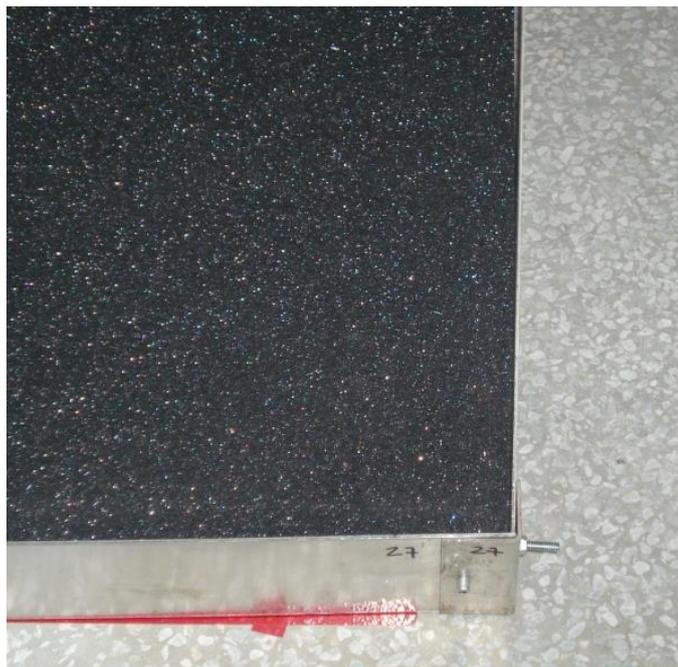


Figura 43 - Câmara contendo amostra de referência e sem difusores



Figura 44 - Câmara contendo amostra de referência e sem difusores



Realizada essa etapa, foi então instalado um conjunto de três difusores estáticos, conforme apresentados anteriormente, perfazendo uma área $5,0 \text{ m}^2$ de cada lado da superfície dos mesmos, conforme Figuras 45 e 46, e em seguida foi medido o novo tempo de reverberação da câmara nessa configuração.

Figura 45 - Instalação de difusores estáticos



Figura 46 - câmara contendo pequena quantidade de difusores – 5,0 m²



Repetiu-se esse procedimento, de modo que fossem instalados 5,0 m² de difusores de cada vez até perfazer um total de 20 m² de área de difusores, sendo essa área relativa a apenas um lado dos difusores. As Figuras 47 e 48 apresentam a configuração final da câmara após instalação de todos os difusores (20 m²).

Figura 47 - Câmara com 20 m² de difusores instalados vista lateral em relação a porta



Figura 48 - Câmara com 20 m² de difusores instalados vista frontal em relação a porta



Obedecendo aos critérios da norma ISO 354:2003, o número ótimo de difusores se deu na configuração de 20 m², atendendo aos requisitos anteriormente citados e que serão apresentados no capítulo correspondente aos resultados experimentais. Os resultados obtidos confirmaram a suficiência deste procedimento para obtenção da condição de difusão.

Tendo agora o campo sonoro como sendo difuso, prosseguiu-se a determinação dos coeficientes de absorção sonora das amostras confeccionadas com cimento e EVA. Inicialmente mediu-se o tempo de reverberação da câmara sem amostra, fazendo os mesmos procedimentos anteriormente adotados, tomando-se esse novo tempo como sendo a referência

para a determinação dos coeficientes de absorção. Esses valores serão apresentados posteriormente.

Em seguida foram instaladas as amostras, inicialmente no traço 1:3,4 com correção granulométrica, conforme Figuras 49 a 51, e medido o tempo de reverberação.

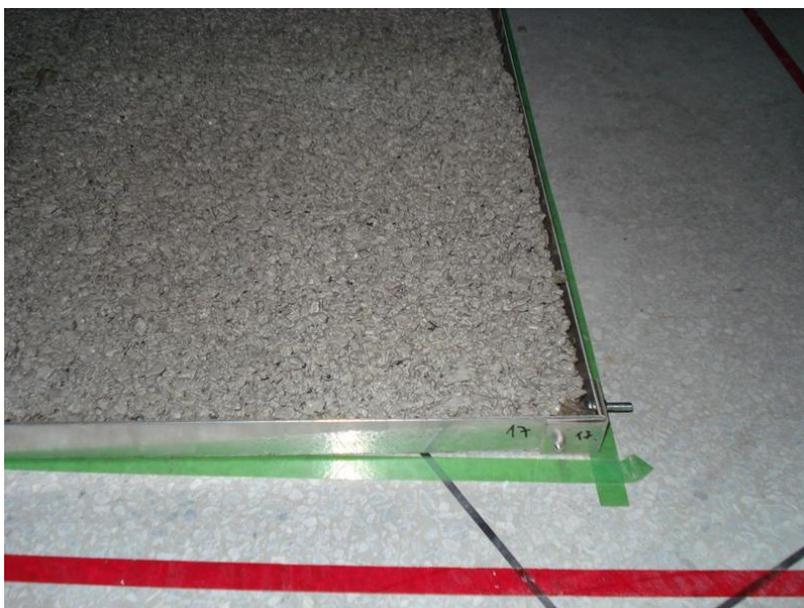
Figura 49 - Montagem amostra traço 1:3,4 (cimento:EVA) na câmara reverberante



Figura 50 - Detalhe montagem da amostra traço 1:3,4 (cimento:EVA) na câmara reverberante



Figura 51 - Detalhe da borda da amostra no traço 1:3,4 (cimento:EVA) protegida com material reflexivo (alumínio)

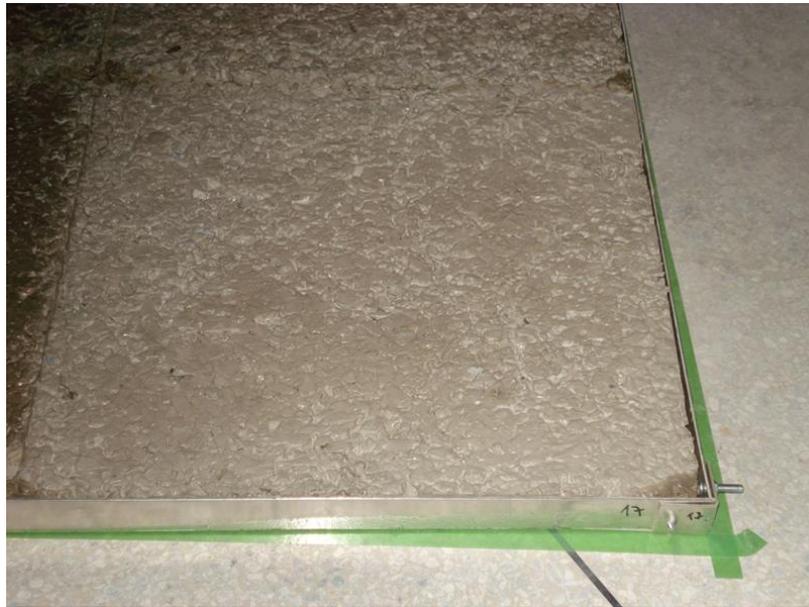


Fez-se em seguida o ensaio com a amostra no traço 1:1,7 (cimento:EVA), adotando-se os mesmos procedimentos e mediu-se o tempo de reverberação da câmara nessa configuração. Nas figuras 52 e 53 apresenta-se a montagem das amostras no interior da câmara.

Figura 52 - Montagem amostra traço 1:1,7 (cimento:EVA) na câmara reverberante



Figura 53 - Detalhe da borda da amostra no traço 1:1,7 (cimento:EVA) protegida com material reflexivo (alumínio)



Concluídas as medições para determinação do tempo de reverberação, determinou-se então o coeficiente de absorção sonora das amostras através da Eq. 18, valores esses que serão apresentados posteriormente no capítulo destinado aos resultados experimentais.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Estudo dos parâmetros intervenientes no coeficiente de absorção sonora

O objetivo principal dos experimentos foi estabelecer correlações entre parâmetros intervenientes no coeficiente de absorção sonora, mais especificamente a análise do índice de vazios e da resistividade ao fluxo de ar, sendo o primeiro de caráter qualitativo e o segundo quantitativo, pois, como visto anteriormente, existem correlações matemáticas entre esses e o coeficiente de absorção sonora. Os resultados desses ensaios serão relatados e comentados a seguir.

7.1.1. Índice de vazios

Os resultados obtidos no ensaio de índice de vazios estão apresentados nas Tabelas 12 e 13 a seguir.

Tabela 12 - Índice de vazios traço 1:1,7 e 1:2,0 (cimento:EVA) sem correção granulométrica

Amostra	Traço	índice de vazios	valor médio
1	1:1,7	21,60%	21,84%
2	1:1,7	22,42%	
3	1:1,7	21,47%	
4	1:1,7	21,86%	
5	1:2,0	20,82%	21,47%
6	1:2,0	21,36%	
7	1:2,0	21,64%	
8	1:2,0	22,04%	

Tabela 13 – Índice de vazios traço 1:1,7 e 1:3,4 (cimento:EVA) com correção granulométrica

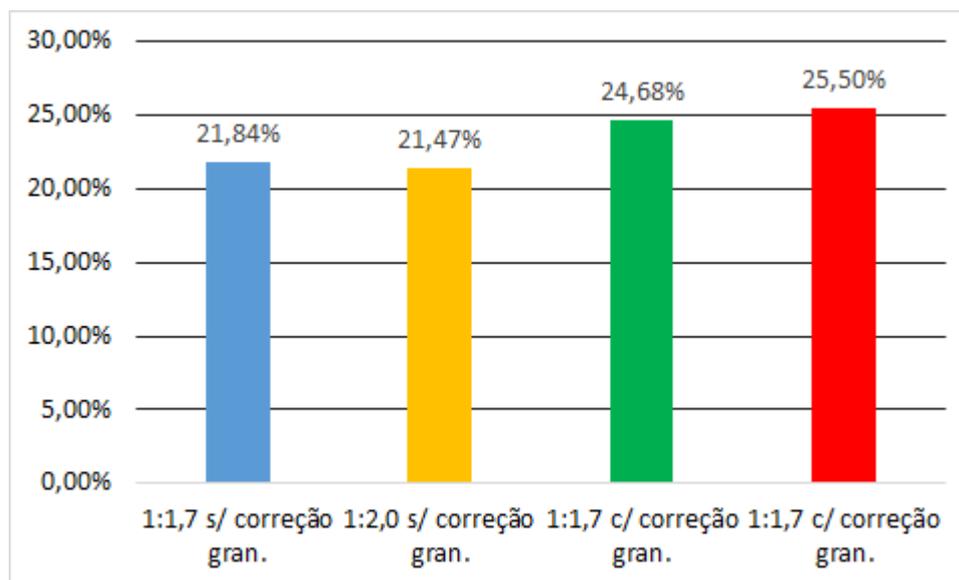
Amostra	Traço	índice de vazios	valor médio
1	1:1,7	25,08%	24,68%
2	1:1,7	25,36%	
3	1:1,7	24,35%	
4	1:1,7	23,93%	
5	1,3,4	24,79%	25,50%
6	1:3,4	25,39%	
7	1:3,4	26,27%	
8	1:3,4	25,54%	

Os traços 1:5,1 e 1:6,8, não foram ensaiados quanto ao índice de vazios. O primeiro traço devido a problemas ocasionados durante o ensaio que não foi possível obter-se a massa do material seco em estufa e o segundo traço devido ao fato das amostras produzidas, pois as mesmas tornaram-se quebradiças até mesmo quando sujeitas a esforços do seu próprio peso.

Observa-se que após realizar a correção granulométrica do granulado de EVA materiais houve um ganho médio de aproximadamente 13,00% no índice de vazios, comparando-se os dados dos compósitos produzidos nos traços 1:1,7.

No que se refere aos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica, houve um acréscimo de cerca de 3,32% no índice de vazios, no comparativo entre esses dois traços, porém esse baixo percentual em relação ao aumento no traço pode ter ocorrido devido ao fato das placas confeccionadas no traço 1:3,4 possuir poros que iam de uma face a outra da placa, o que praticamente não ocorria no traço 1:1,7. Sendo assim quando as mesmas eram pesadas na condição saturada com superfície seca, a água contida nesses poros escorria e dessa forma não era contabilizado esse valor adicional, sendo esse fenômeno observado visualmente quando da realização dos ensaios. Os resultados obtidos no ensaio de determinação do índice de vazios estão apresentados graficamente na Figura 54 a seguir.

Figura 54 - Índice de vazios das amostras nos traços 1:1,7 e 1:2,0 sem correção granulométrica, e 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica



O aumento do índice de vazios com a correção granulométrica está associado à melhoria da disposição do granulado de EVA no interior da placa, sendo perceptível no processo de fabricação das placas que com a correção granulométrica o agregado de EVA não houve o acúmulo de pasta de aglomerante nos locais em que não havia uma boa distribuição granulométrica no interior das placas.

7.1.2. Resistividade ao fluxo de ar

Durante a realização do ensaio de resistividade ao fluxo de ar, inicialmente foi proposto que a área de medição da velocidade fosse restrita a área ocupada pela amostra instalada no túnel de vento. Sendo assim instalou-se um canal de forma prismática, conforme mostrado na Figura 55, de modo a direcionar o fluxo que atravessava a placa e dessa forma realizou-se a medição da velocidade normal à superfície da placa.

Figura 55 – Instalação da amostra no túnel de vento com fluxo direcionado por canal prismático



Em seguida retirou-se o canal e realizou-se nova medição da velocidade. Observou-se então que os valores medidos sem o canal eram superiores à configuração com o canal em aproximadamente 50%. Essa diferença, quando da colocação do canal direcionador, pode ter sido ocasionada devido ao arrasto (atrito) oferecido pelo material do qual o canal foi confeccionado, no caso papelão, e dessa forma houve uma perda de energia e conseqüentemente medições de valores inferiores em relação a configuração que não continha o canal. Por outro lado, essa diferença pode também ter sido ocasionada devido a formação de uma região de maior pressão no interior do canal que necessitando, assim de uma maior pressão para que houvesse o deslocamento dessa massa de ar e sendo assim ocasionando uma redução no fluxo, o que foi detectado durante as medições.

De modo a representar a situação real em que essas placas irão funcionar, optou-se pela retirada desse canal, pois quando as mesmas forem instaladas e postas em funcionamento esse canal direcionador fisicamente não irá existir.

Realizou-se então as medições da velocidade nessa configuração e determinou-se a resistividade ao fluxo de ar das amostras, conforme Eq. 25, que são apresentados na Tabela 14 a seguir.

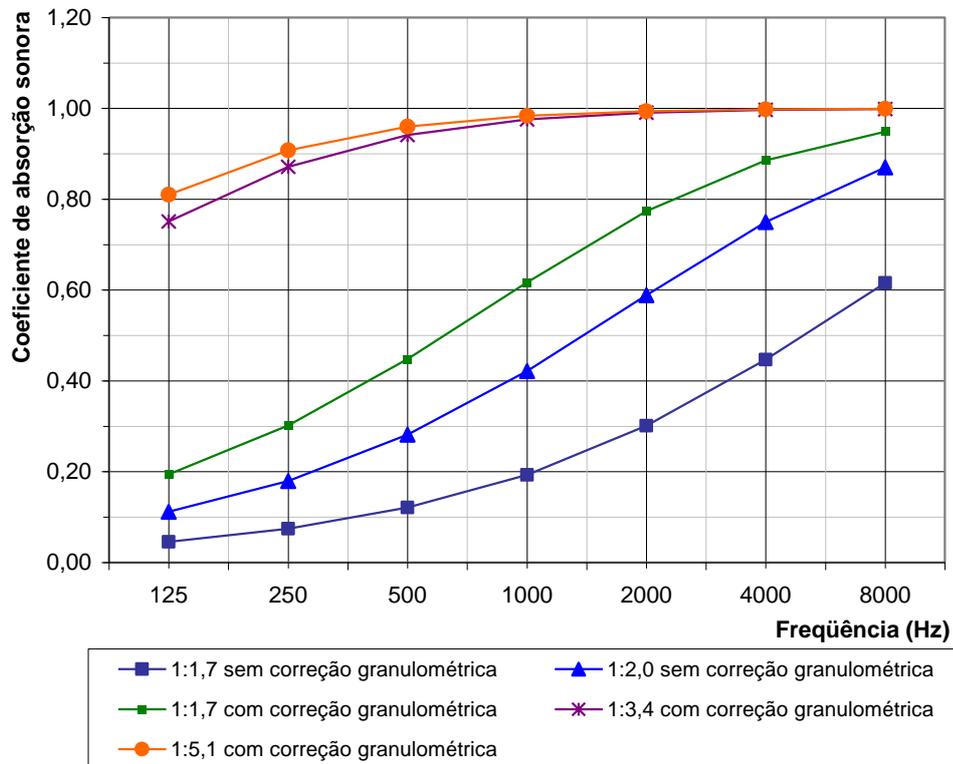
Tabela 14 – Resultados do ensaio de resistividade ao fluxo de ar das amostras

Traço	velocidade média real (m/s)	Resistividade ao fluxo (Rayl/m)
1:1,7 s/ correção gran.	0,0088	7,13E+05
1:2,0 s/ correção gran.	0,0314	1,99E+05
1:1,7 c/ correção gran.	0,0706	8,85E+04
1:3,4 c/ correção gran.	1,0120	6,18E+03
1:5,1 c/ correção gran.	1,3695	4,56E+03

Observa-se que houve uma diferença significativa entre as resistividades ao fluxo das amostras confeccionadas no traço 1:1,7 e 1:3,4, ambos com correção granulométrica. Entretanto a mesma taxa de crescimento não se deu entre os traços 1:3,4 e 1:5,1 com correção granulométrica, uma vez que o aumento na relação aglomerante/agregado é mesma que no primeiro caso.

Correlacionando matematicamente a resistividade ao fluxo do ar com o coeficiente de absorção acústica, através da Eq. 27, adotando-se a densidade do ar como sendo de 1,225 kg/m³, tem-se a seguinte distribuição do coeficiente de absorção sonora nas faixas de banda 1/1 de oitava, conforme apresentado na Figura 56 a seguir.

Figura 56 - Coeficiente de absorção sonora obtidos a partir da resistividade ao fluxo de ar



De posse desses dados, selecionou-se as amostras que seriam verificadas no ensaio em câmara reverberante como sendo as produzidas nos traços 1:1,7 e 1:3,4, ambas com correções granulométricas, por apresentar valores bastantes distintos, sendo provável a repetição dessa diferença quando ensaiadas em câmara reverberante, podendo assim trazer uma melhor correlação entre os parâmetros investigados no presente trabalho. Cabe notar que o traço 1:5,1 não apresentou diferenças significativas em relação ao traço 1:3,4, sendo então o primeiro descartado para a realização do ensaio em câmara reverberante.

Dessa forma a Figura 56 apresenta uma estimativa matemática dos valores dos coeficientes de absorção acústica, obtidos a partir da determinação da resistividade ao fluxo de ar da placa.

7.1.3. Calibração da câmara reverberante

Conforme descrito anteriormente, antes de realizar o ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora dos protótipos, fez-se necessário a calibração da câmara quanto à difusividade do campo sonoro no interior da mesma.

Seguindo os procedimentos da norma ISO 354:2003, citados anteriormente, deve-se fazer a média do coeficiente de absorção sonora da amostra de referência, nas faixas de 500 a

4000 Hz, e representá-los graficamente em função da área de difusores instalados a cada medição. Na Tabela 15 apresenta-se os tempos de reverberação obtidos nas diversas configurações utilizadas durante o procedimento de calibração, enquanto na Tabela 16 apresenta-se os valores do coeficiente de absorção sonora obtidos durante o procedimento de calibração da câmara, e na Figura 57 representa-se a média dos coeficientes nas faixas de 500 a 4000 Hz em função da área de difusores instalados. A amostra de referência utilizada foi a espuma acústica SONIQUE CLASSIC 50C, conforme descrito no capítulo referente a metodologia experimental.

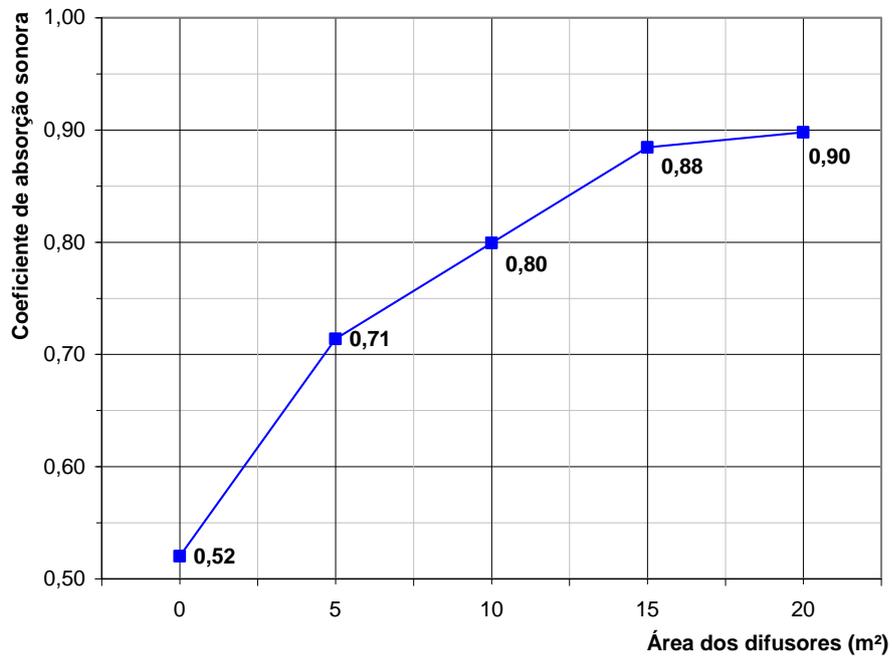
Tabela 15 - Tempo de reverberação relativos ao ensaio de calibração da câmara reverberante

Ensaio	Frequência (Hz) / Tempo de reverberação (s)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sem amostra sem difusores	19,07	16,29	12,84	9,52	6,23	4,49	2,95
Com amostra sem difusores	11,15	8,42	4,35	3,19	2,64	2,42	1,94
Com amostra com 5m ² de difusores	9,91	6,75	3,25	2,53	2,27	2,09	1,73
Com amostra com 10m ² de difusores	9,06	6,18	3,07	2,28	2,11	1,96	1,61
Com amostra com 15m ² de difusores	8,97	5,74	2,92	2,09	1,95	1,85	1,52
Com amostra com 20m ² de difusores	9,19	5,53	2,96	2,11	1,92	1,78	1,49

Tabela 16 – Coeficiente de absorção sonora para amostra de referência em relação a área de difusores instalados

Ensaio	Frequências (Hz) / Coeficiente de absorção sonora				
	500	1000	2000	4000	Médio
Com amostra sem difusor	0,41	0,56	0,59	0,52	0,52
Com amostra com 5m ² de difusor	0,61	0,78	0,76	0,69	0,71
Com amostra com 10m ² de difusor	0,67	0,90	0,85	0,78	0,80
Com amostra com 15m ² de difusor	0,71	1,00	0,95	0,86	0,88
Com amostra com 20m ² de difusor	0,69	0,99	0,97	0,92	0,89

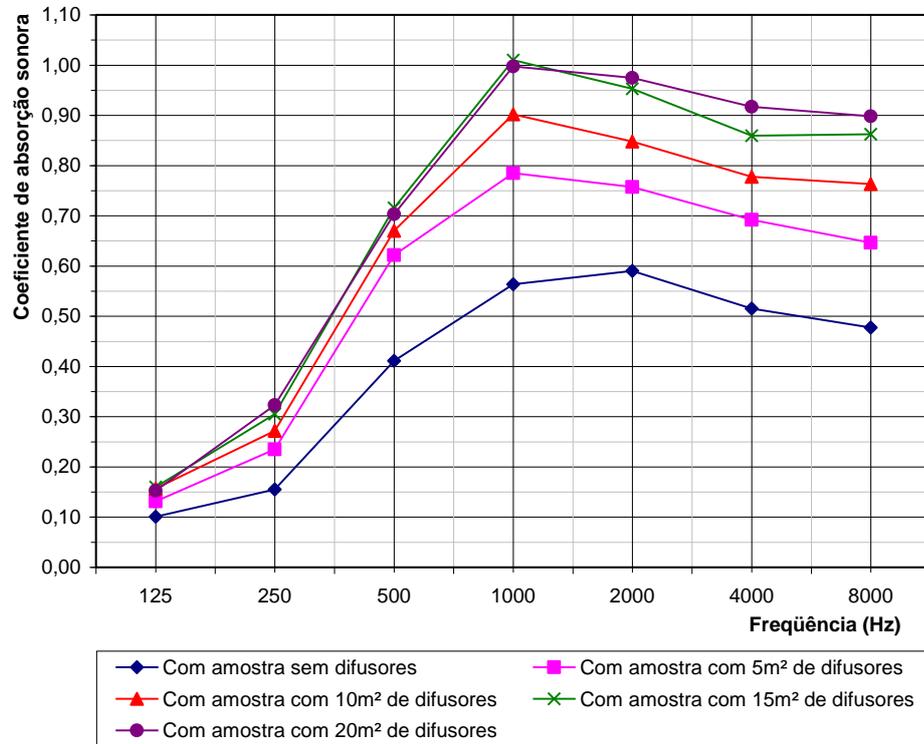
Figura 57 – Coeficiente de absorção sonora da amostra de referência em função da área de difusores estáticos instalados no interior da câmara



Com uma área, em cada face, de 20 m², o valor do coeficiente de absorção sonora da amostra de ensaio permaneceu praticamente constante com variações em torno de 1,5%, quando a tendência de variação até a instalação de 15 m² de difusores era superior a 10%. Logo, conforme os critérios da norma ISO 354:2003, o número ótimo de difusores corresponde à área de 20 m², e dessa forma o campo sonoro no interior da câmara é dito difuso.

O comportamento das curvas relativas ao coeficiente de absorção sonora nas diversas faixas de frequências de banda 1/1 de oitava, nas faixas entre 125 e 8000 Hz, estão representadas na Figura 58.

Figura 58 - Coeficiente de absorção sonora do material absorvente de referência nas faixas de 125 a 8000 Hz em função da área de difusores instalados



Importante destacar que os ensaios foram realizados dentro das condições ambientais recomendadas na Tabela 10, não necessitando assim de correções nos valores obtidos.

Destaque-se que a câmara reverberante está em conformidade com a norma ISO 354:2003, tanto no que se refere a difusão do campo sonoro, conforme explicitado anteriormente, quanto a área equivalente de absorção equivalente que deve atender aos limites definidos na Tabela 9, de posse dos dados da Tabela 15 e substituindo-os na Eq. 13, porém desprezando-se o termo referente a absorção sonora do ar, pois o ensaio se manteve dentro das condições estabelecidas na Tabela 10, têm-se então que as áreas de absorção sonora equivalente da câmara são dadas conforme a Tabela 17 a seguir.

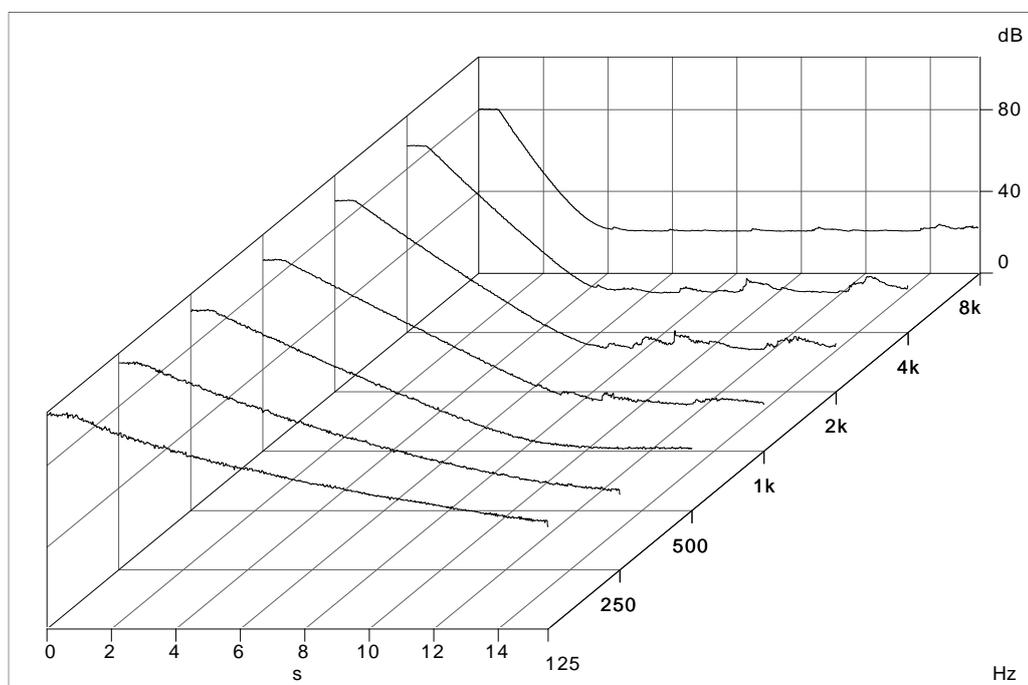
Tabela 17 – Área de absorção equivalente da câmara reverberante da UFPB

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Área de absorção sonora equivalente (m²)	2,1	2,9	3,7	4,2	5,6	7,7

7.1.4. Coeficiente de absorção sonora dos protótipos ensaiados em câmara reverberante

Realizada a calibração da câmara reverberante, quanto à difusividade do campo sonoro no seu interior, fez-se então uma nova medição do tempo de reverberação da câmara vazia com os 20 m² de difusores instalados, de modo a ser utilizado na determinação do coeficiente de absorção sonora das amostras produzidas com cimento e EVA. As curvas médias de decaimento (multi-espectro) para essa configuração da câmara reverberante estão apresentadas na Figura 59 a seguir.

Figura 59 - Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara vazia com 20 m² de difusores instalados



Seguindo os mesmos procedimentos adotados anteriormente, instalou-se primeiramente a amostra produzida no traço 1:3,4 com correção granulométrica, de modo a se determinar o tempo de reverberação no interior da câmara e conseqüentemente o coeficiente de absorção sonoro do mesmo. O ensaio foi realizado à temperatura de 29,6°C e umidade relativa do ar de 83,6%.

Da mesma forma foram então ensaiadas as amostras no traço 1:1,7 com correção granulométrica, sendo esse realizado nas mesmas condições de temperatura e umidade as do traço 1:3,4 e dentro dos limites estabelecidos na Tabela 10, os resultados obtidos em ambos ensaios estão apresentados nas Tabelas 18 e 19, e comparados graficamente na Figura 60.

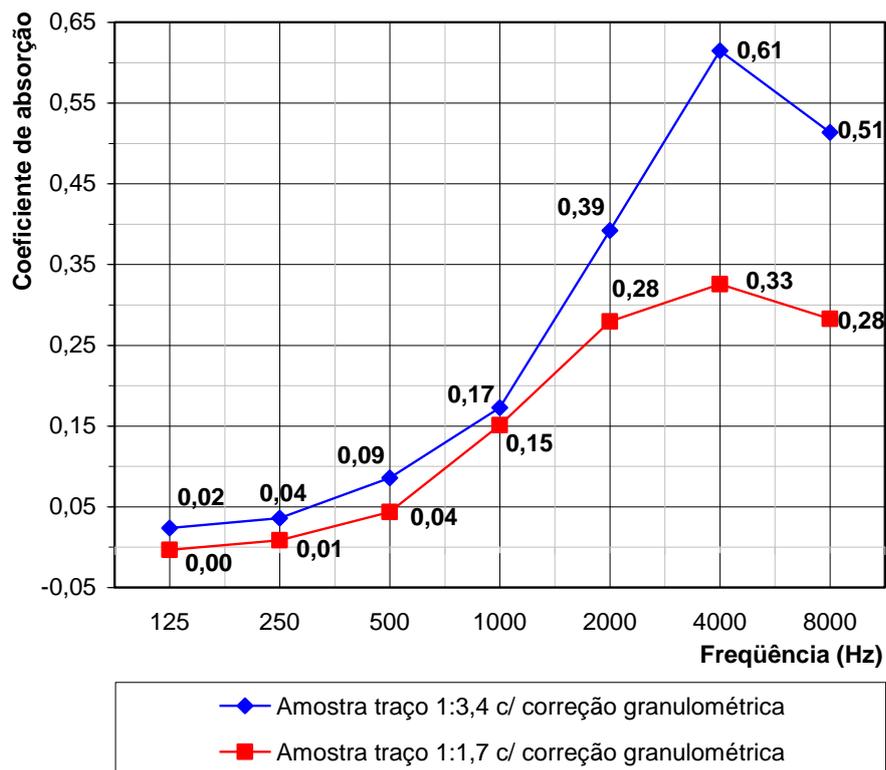
Tabela 18 – Tempo de reverberação de referência e com amostras nos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica

Ensaio	Frequência (Hz) / Tempo de reverberação (s)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sem amostra com 20 m ² difusor - Referência	15,04	10,85	8,58	7,49	5,61	4,10	2,78
Com amostra traço 1:3,4 c/ correção granulométrica	13,54	9,67	6,97	5,33	3,32	2,29	1,92
Com amostra traço 1:1,7 c/ correção granulométrica	15,30	10,55	7,68	5,53	3,76	2,89	2,23

Tabela 19 – Coeficiente de absorção sonora das amostras nos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica

Ensaio	Frequência (Hz) / Tempo de reverberação (s)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Amostra traço 1:3,4 c/ correção granulométrica	0,02	0,04	0,09	0,17	0,39	0,61	0,51
Amostra traço 1:1,7 c/ correção granulométrica	0,00	0,01	0,04	0,15	0,28	0,33	0,28

Figura 60 – Coeficiente de absorção sonora das amostras traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica



As curvas médias de decaimentos para os ensaios realizados com as amostras nos traços 1:1,7 e 1:3,4 com correção granulométrica estão apresentados nas Figuras 61 e 62, respectivamente, a seguir.

Figura 61 – Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara com amostra 1:1,7 com correção granulométrica

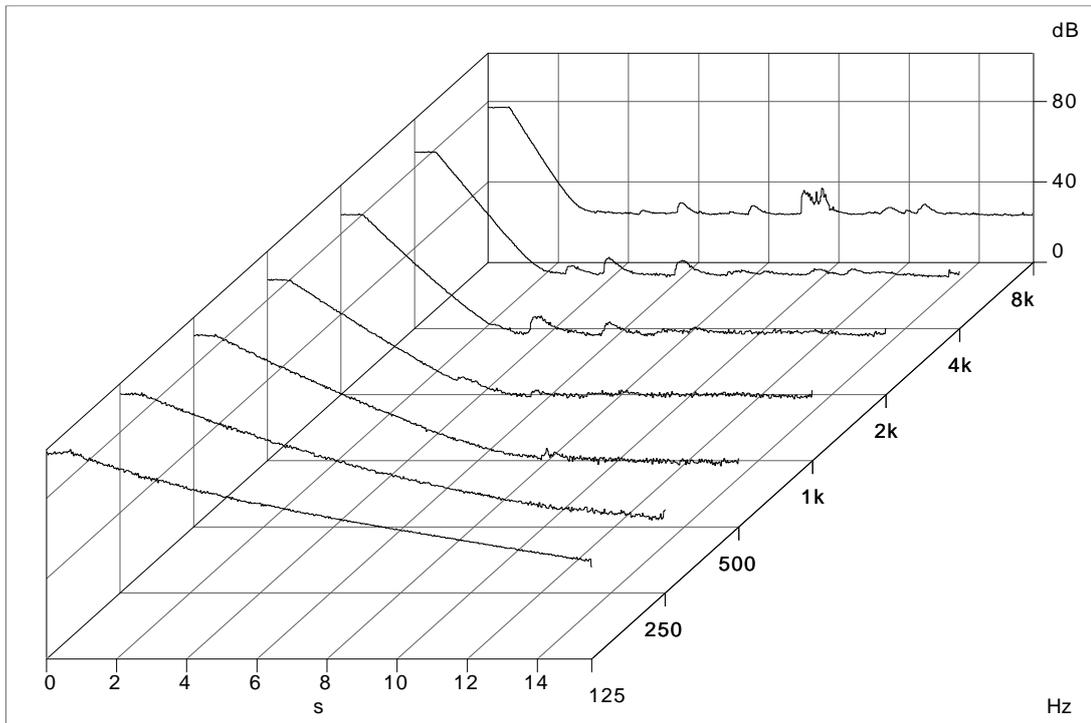
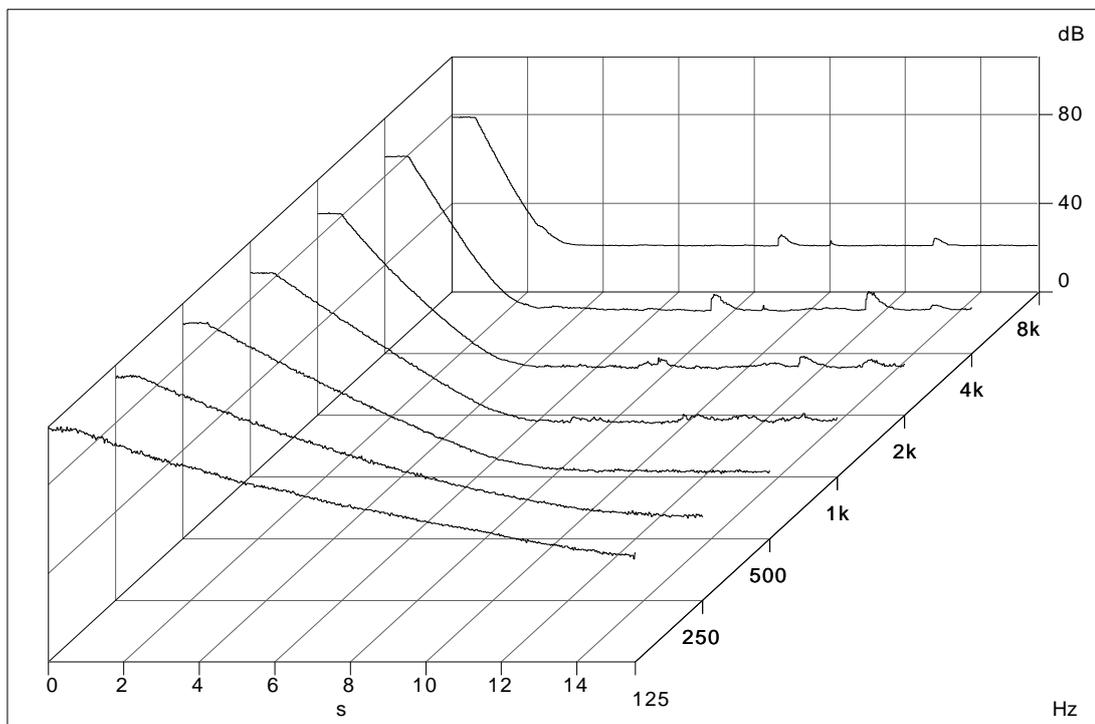


Figura 62 - Multi-espectro para curvas médias de decaimento da câmara com amostra 1:3,4 com correção granulométrica



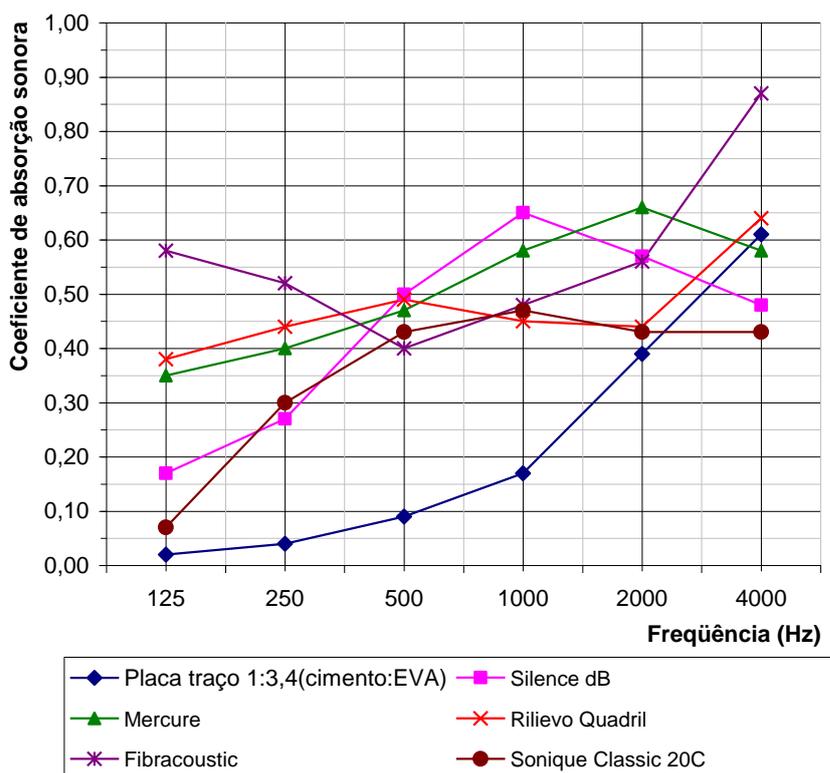
Observa-se dos resultados obtidos na Tabela 19 que houve um aumento significativo do coeficiente de absorção sonora nas frequências de 1 a 4 kHz nas amostras confeccionadas no traço 1:3,4.

A título de ilustração, cabe apresentar comparativo com outros materiais acústicos produzidos industrialmente com composição variada. Para tal comparação, selecionou-se os produtos indicados na Tabela 20, que consta também a composição dos mesmos, tendo o gráfico comparativo apresentado na Figura 64. Os coeficientes de absorção acústica dos materiais industrializados foram fornecidos pelos fabricantes dos mesmos.

Tabela 20 – Discriminação e composições de materiais acústicos industrializados

Produto	Fabricante	Espessura (mm)	Composição
Silence dB	AMF/KNAUF	30	Fibra mineral biossolúvel, perlita, argila e aglomerantes orgânicos
Mercure	AMF/KNAUF	15	Fibra mineral biossolúvel, perlita, argila e aglomerantes orgânicos
Rilievo Quadril	AMF/KNAUF	12,5	Chapas de gesso acartonado
Fibracoustic	AMF/KNAUF	25	Painéis de fibra longas de madeira agregadas com cimento cinza ou banco
Sonique Classic 20C	VIBRASOM	20	espuma flexível de poliuretano poliéster expandido

Figura 63 - Comparativo entre materiais industrializados e amostra traço 1:3,4 c/ correção granulométrica



O tratamento acústico nas faixas de frequências entre 1 e 4 kHz se faz importante, pois inclusive é na faixa de 1 a 3kHz que se situa a zona de conversação, ou seja, nesta faixa é onde a fala pode ser audível ao receptor. De maneira a obter melhores resultados em faixas de frequência mais baixas, as placas poderiam ser posicionadas afastadas da superfície refletora, de acordo com MEHTA *et al* (1999), os valores máximos de velocidade das partículas ocorrem às distâncias de $0,25\lambda$, $1,25\lambda$, etc., no caso em estudo, se quisermos que o material tenha um melhor desempenho de absorção na frequência de 2kHz, considerando a velocidade de propagação do ar como sendo 340 m/s, sendo a espessura do material de 2cm, utilizando as equações 10 e 11, teríamos que afastar a placa em 2,25cm da superfície refletora para que ela tenha uma melhor absorção acústica na faixa de inferior ou igual a 2kHz, porém continuaríamos a utilizar o mesmo material, trazendo assim economia, pois caso contrário seria necessária uma placa com pelo menos 4,25cm para obter-se melhores resultados na faixa de frequência de 2kHz.

8. CONCLUSÕES

Atendendo aos objetivos deste trabalho, foram confeccionados protótipos produzidos com cimento Portland e resíduo industrial, no caso EVA, na forma de placas, de modo a agregar valor a esses materiais e averiguar uma alternativa de reaproveitamento dos mesmos como materiais para adequação acústica de ambientes, diminuindo assim a deposição dos mesmos em aterros ou no meio ambiente.

Inicialmente investigou-se a produção desse resíduo e seu crescimento na região onde foi realizado o estudo, verificando a necessidade de um destino final para os mesmos, haja vista a crescente produção e a limitação de alternativas sustentáveis para o seu reaproveitamento. A viabilidade de utilizar o resíduo como material absorvente acústico necessita de investigação de fatores que podem interferir no desempenho acústico.

De maneira a controlar e aperfeiçoar o desempenho desses revestimentos investigou-se parâmetros de caráter qualitativo bem como quantitativos que tem correlação direta com o coeficiente de absorção acústica.

O índice de vazios apresenta-se como um parâmetro qualitativo. Durante os ensaios realizados no presente estudo, observou-se que o simples beneficiamento através do peneiramento e separação de frações da matéria-prima utilizada na produção das placas acústicas, no caso o resíduo de EVA, acarretou em um acréscimo de poros permeáveis no interior dos compósitos, permitindo assim um melhor desempenho acústico.

A resistividade ao fluxo de ar, obtida a partir da adaptação do método prescrito na NBR 8517/2003, apresenta-se como um fator preponderante na eficiência de um material acústico. O ensaio prescrito pelas normas brasileiras para determinação da resistividade ao fluxo de ar de espumas foi adaptado ao caso de estudo, e dessa forma foram obtidas estimativas do coeficiente de absorção sonora. Apesar dos valores apresentarem-se numericamente distintos dos posteriormente obtidos quando realizado o ensaio em câmara reverberante, observou-se que havia uma diferença nos mesmos entre as placas produzidas, principalmente nos traços 1:1,7 e 1:3,4 (cimento:EVA) com correção granulométrica, sendo essa confirmada durante a realização do ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora.

Os resultados obtidos no ensaio realizado em câmara reverberante confirmaram a hipótese inicial que correlaciona a resistividade ao fluxo com a capacidade de absorção

sonora, bem como o fator estrutural correspondente à espessura do material, pois os coeficientes de absorção acústica foram melhores na faixa de 4 kHz, sendo essa a faixa inicialmente esperada para que o material obtivesse melhor desempenho.

As placas produzidas no traço 1:3,4 com correção granulométrica apresentaram potencial uso na adequação acústica de ambientes, tendo inclusive desempenho superior a materiais industrialmente produzidos, a exemplo de espumas flexíveis de poliuretano poliéster expandido e produtos produzidos com fibras minerais, perlita, argila e aglomerantes orgânicos na faixa de frequência de 4kHz. Apresentou ainda um comportamento próximo ao de materiais produzidos com placas de gesso acartonado. Esse potencial se dá devido ao fato da adequação acústica estar correlacionada à frequência que se deseja tratar. Caso essa frequência esteja situada na faixa de 2 a 4 kHz, pode esse material vir a substituir com eficiência materiais industrializados.

8.1. Sugestões para futuros trabalhos

Os itens seguintes são apresentados como sugestões para trabalhos futuros:

- Ensaiai o material em câmara reverberante simulando de fato um forro de teto, com espaçamento entre esse e a superfície de anteparo dado conforme as correlações citadas no corpo deste trabalho, de modo a verificar o desempenho do mesmo em outras faixas de frequência;
- Realizar um estudo de caso de adequação acústica, onde esses materiais são utilizados em um ambiente e comparando os resultados antes e após a instalação dos mesmos, podendo assim verificar a eficácia dos resultados produzidos na câmara reverberante;
- Desenvolver expressões analíticas que venham a estimar com melhor precisão o coeficiente de absorção sonora dos materiais produzidos com esse resíduo industrial;
- Selecionar novas matrizes para fabricação de protótipos, substituindo-se o cimento Portland por aglomerantes aéreos, a exemplo de gesso.
- Aperfeiçoar o processo construtivo das placas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICALÇADOS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS. **Relatório Anual 2006 – ABICALÇADOS**. Novo Hamburgo, 2006.

ABICALÇADOS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS. **Exportações brasileiras de calçados por Estado 2007**. Novo Hamburgo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: **Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: **Agregado em estado solto: determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto 02:135.01-002, **Acústica - Medição da absorção sonora em sala reverberante – Método de ensaio**, Brasil, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8517: **Espuma flexível de poliuretano – Determinação da passagem de ar através da espuma**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão: Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 1987

ARAÚJO, M. N. C. **Investigações sobre os parâmetros envolvidos na medição de absorção sonora em câmaras reverberantes**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2002. Originalmente apresentada como dissertação de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

BARING, J. G. A. **Isolação sonora de Paredes e Divisórias**. Tecnologia das edificações, p. 429-434. São Paulo: IPT/SP, 1988.

BERANEK. L. L. **Noise and Vibration Control**. [S.l.], McGraw-Hill, 1971.

BEZERRA, A. J. V. **Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA – Etileno Acetato de Vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural**. Campina Grande, PB: [s.n.], 2002. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2002.

BISFATA, S. R.; BRADLEY, J. S. **Predicting reverberation times in a simulated classroom**. Journal of the Acoustical Society of America, Ottawa (Canada), V. 108, n. 4, p. 1721-1731, Oct. 2000.

BENEDETTO, G., BROSIO, E. SPAGNOLO, R. **The Effect of Stationary Diffusers in the Measurement of Sound Absorption Coefficients in a Reverberation Room: an Experimental Study**. Applied Acoustics, V.14, pp. 49-63, 1981.

BRÜEL & KJAER. **Technical Documentation: User Manual**. Brüel e Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S, 2003.

CONCHA-BARRIENTOS, M.; CAMPBELL-LEDRUN, D.; STEENLAND, K. **Occupational noise: Assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels.** Geneva, World Health Organization, 2004.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics.** New York, 4th. ed., McGraw-Hill, 2001

FERREIRA, J. A. C. **Avaliação acústica de residências: Resultados medidos e simulados.** Dissertação de mestrado. Curitiba, UFPR, 2004.

FITZROY, D. **Reverberation Formula Which Seems to Be More Accurate with Non uniform Distribution of Absorption.** Journal of Acoustical Society of America, v. 31, n. 7, (Jul), pp. 893-897, 1959.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil.** Porto Alegre, 1998. 146p. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

GARLET, G.; GREVEN, H. A. **Concreto leve usando resíduos de E.V.A. da indústria calçadista.** In: Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidade Sustentáveis, 1., Canela, RS. **Anais.** Canela, RS: ANTAC, 1997.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e controle.** Florianópolis: Editora UFSC, 1992.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. ISO 354:2003: **Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room.** Suíça, 2003.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. ISO 9613-1: **Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.** Suíça, 1993.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. ISO 9613-2: **Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation.** Suíça, 1996.

KINSLER, L.E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J.V. **Fundamentals of Acoustics.** [S.l.], 3rd. ed., Wiley, 1982.

MAIA, P. A. O Ruído nas Obras da Construção Civil e o Risco de Surdez Ocupacional. Tese de Mestrado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

MATTOS, A.C. **A Engenharia do som.** Disponível em: <http://www.universal.net.br/acmm/CURIOSIDADES/INSTRUMENTOS_MUSICAIS/Textos/Eng_Som/Engenharia_do_Som.htm>. Acesso em: 21 ago. 2005.

MATTOS, M.G. **Difusidade do campo sonoro de câmara reverberante para a medição de absorção sonora.** Tese de Mestrado. Florianópolis, UFSC, 1999.

MEHTA M.; JOHNSON J.; ROCAFORT, J. **Architectural Acoustics Principles and Design.** New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

MILLINGTON, G. **A Modified Formula for Reverberation.** Journal of Acoustical Society of America, IV, (Jul), pp. 69-82, 1932.

NAVARRO, M. P. N. **Conforto acústico em ambientes de praças de alimentação em shopping centers.** João Pessoa, PB: [s.n.], 2004. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2004.

NEUBAUER, R. O. **Estimation of Reverberation Time in Rectangular Rooms with a Modified Fitzroy Equation.** In: Seventh International Congress on Sound and Vibration, 1709-1716, Garmisch, Alemanha, 04-07 July, 2000.

POLARI FILHO, R. S.; MELO, A. B.; BARBOSA, N. P. **A reciclagem de resíduos da indústria de calçados (EVA) na execução de painéis de vedação na construção civil: avaliação de desempenho.** In: Encontro Temático Meio Ambiente e Educação Ambiental, 2., João Pessoa. **Anais.** João Pessoa, PB: [s.n.], 2003

SANTOS, J. L. P. **Estudo do potencial tecnológico de materiais alternativos em absorção acústica.** Santa Maria: Editora UFSM, 2005.

SETTE, W. J. **A New Reverberation Time Formula.** Journal of Acoustical Society of America, IV, (Jan), pp. 193-210, 1933.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica.** Belo Horizonte: Edições Engenharia e Arquitetura, 1971.

TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná. **Formulário de Resposta Técnica Padrão.** Disponível em: <<http://www.tecpar.gov.br>>. Acesso em: 21 ago. 2005.

WARNOCK, A. C. C. **Some Practical Aspects of Absorption Measurements in Reverberation Rooms.** Journal of Acoustical Society of America, v. 74 n.5, (Nov), pp. 1422-1432, 1983.