

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TÉCNICA VIA TUBO DE IMPEDÂNCIA E ESTUDO SUSTENTÁVEL DA LÃ DE PET
COMO SUBSTITUTA DE MATERIAIS COMERCIAIS EM APLICAÇÕES ACÚSTICAS

por

Ricardo Vargas Aranha

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2019.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉCNICA VIA TUBO DE IMPEDÂNCIA E ESTUDO SUSTENTÁVEL DA LÃ DE PET
COMO SUBSTITUTA DE MATERIAIS COMERCIAIS EM APLICAÇÕES ACÚSTICAS

por

Ricardo Vargas Aranha

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 01 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, e não podendo ser diferente, agradeço aos meus pais por todo apoio que recebi durante não só o período do trabalho de conclusão, mas ao longo de toda graduação, de toda a minha vida. Sem o apoio incondicional deles, certamente eu não teria condições de ter alcançado todas minhas conquistas e ter tido tantas experiências relevantes para minha formação acadêmica e cidadã. Eles são meus primeiros professores e continuam me ensinado diariamente a ser uma pessoa melhor. Estendo os agradecimentos a minha família, aos meus amigos mais próximos e especialmente a minha namorada, que esteve a meu lado, proporcionando-me condições emocionais para sempre persistir em meus objetivos, nunca me sentir desamparado, tampouco duvidar da minha capacidade.

Agradeço a oportunidade de ter estudado numa universidade pública, de qualidade, como a Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituição que, apesar dos diversos problemas enfrentados (muitos facilmente identificáveis, outros absolutamente intrínsecos) continua dispondo de um corpo docente e discente diferenciado, que certamente tem um potencial gigantesco de contribuição para a nossa sociedade, não só em termos técnicos. Após tantos momentos de resiliência estudantil, relativos ao austero processo de aprendizagem exigido por um curso de Engenharia Mecânica, problemas de infraestrutura, práticas didáticas muitas vezes obsoletas, acabamos valorizando os aprendizados obtidos nessa caminhada; e mesmo desgastados, chegamos nesse momento exaltando orgulho desta que, muitas vezes, chamamos de nossa segunda casa.

Agradeço a todas as pessoas que passaram pela minha vida e de alguma forma contribuíram com meu desenvolvimento durante esse período. Colegas que passaram horas de estudo comigo, assim como aqueles que me proporcionaram momentos de descontração nas horas necessárias. Também agradeço as diversas oportunidades recebidas e o aprendizado obtido com todos os “professores” que conheci em bolsas e estágios. Após esses anos, muitas dessas pessoas podem não estar próximas de mim, mas suas contribuições serão para sempre lembradas com muito apreço e gratidão. Além disso, sou extremamente grato por ter tido a oportunidade de aprender com verdadeiros mestres, que exercem diariamente sua majestosa função de ensinar, servindo como referências na formação pessoal e profissional dos alunos. Destaco o Professor Herbert e a Professora Letícia que foram meus orientadores de estágio e TCC, e sempre se mostraram acessíveis e disponíveis para me auxiliar em questões diversas.

Por fim, agradeço ao LVA, da Universidade Federal de Santa Catarina, por ter disponibilizado suas dependências e seus equipamentos para que a parte experimental desse trabalho fosse feita, e especialmente a aluna Luísa pelo auxílio em todos os ensaios conduzidos. Adaptando a frase do poeta inglês, John Donne: “Nenhum homem é uma ilha, isolado, suficiente e completo em si mesmo”. Sem o apoio de todas essas pessoas, esse momento de conclusão de curso seria, provavelmente, inviável. Muito obrigado!

“Cause there's always a reason
There's always a way
There's always a better word to say
And there's always an answer
There's always a why
There's always a chance to give a try

Always more, always more
There's always more to know

So let's say you have answers
So let's say you know why
Let's say you have reached the final line

There's always more”

Angra – Always More

Aranha, R.V. **Análise técnica via tubo de impedância e estudo sustentável da lã de PET como substituta de materiais comerciais em aplicações acústicas**. 2019. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Novos métodos e materiais estão sendo analisados de modo a substituir práticas não tão conscientes com o meio ambiente, na chamada engenharia sustentável, que busca alinhar o desenvolvimento tecnológico e organizacional sem afetar o contexto ambiental. Dentro desse contexto de desenvolvimento sustentável, a lã de Polietileno Tereftalato (PET) aparece como uma solução consciente, segura e eficaz para soluções acústicas. O material é produto da reciclagem do polímero e sua maior utilização significa agregar valor a toda cadeia que cerca a reciclagem, gerando mais renda e emprego principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. O objetivo principal desse trabalho foi analisar sua eficácia em termos de absorção sonora quando comparada aos seus concorrentes de mercado, com ênfase em aspectos técnicos, mas destacando também benefícios ambientais e econômicos. Parte substancial deste estudo teve caráter experimental, realizado de acordo com a norma ISO 10534-2, o que forneceu os valores de absorção sonora em tubo de impedância, usados para a subsequente análise comparativa dos resultados. Esse experimento forneceu um gráfico com o coeficiente de absorção sonora dentro de uma faixa de frequência definida pela configuração instrumental. A lã de PET apresentou um desempenho satisfatório, e mesmo que sua eficácia tenha sido ligeiramente inferior quando comparada aos demais materiais testados, seu apelo sustentável e seus atributos podem vir a justificar a sua escolha para diversas aplicações.

PALAVRAS-CHAVE: Absorção sonora, Lã de PET, Tubo de Impedância, Engenharia sustentável.

ARANHA, R.V. **Technical analysis via impedance tube and sustainable study of PET wool as a substitute for commercial materials in acoustics applications**. 2019. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

New methods and materials are being analyzed in order to replace practices that are not so environmentally conscious, in so-called sustainable engineering, which seeks to align technological and organizational development without affecting the environmental context. Within this context of sustainable development, the Polyethylene terephthalate (PET) wool appears as a conscious, safe and efficient solution for acoustic solutions. The material is a product of PET's recycling process and the increase of its use means add value to the whole chain that surrounds the recycling domain, generating more income and employment mainly in developing countries, such as Brazil. The main objective of this work was to analyze its efficiency in terms of sound absorption when compared to its market competitors, with emphasis on technical aspects, but also highlighting environmental and economic benefits. A substantial part of this study was experimental, performed in accordance with ISO 10534-2, which provided the impedance tube sound absorption test values, used for a subsequent comparative analysis of the results. This experiment provided a diagram with the coefficient of sound absorption within a frequency range defined by the instrumental configuration. PET wool presented a satisfactory performance, and even though its effectiveness was slightly lower than the other tested materials, its sustainable role and attributes may justify its choice for diverse applications.

KEYWORDS: Sound absorption, Acoustic Polyethylene Terephthalate (PET) wool, Impedance tube, Sustainable engineering.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4.1 Comportamento de uma onda sonora ao encontrar um obstáculo	4
4.2 Absorção sonora e coeficiente de absorção sonora (α).....	4
4.3 Materiais absorvedores acústicos	5
4.4 Medição sonora por incidência normal (ISO 10534-2).....	6
5. METODOLOGIA.....	8
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	8
6.1 Materiais	8
6.1.1 Lã de PET	8
6.1.2 Lã de rocha	9
6.1.3 Espuma/manta de poliuretano	9
6.2 Tubo de impedância e aparato experimental.....	10
6.3 Preparação das amostras	11
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
7.1 Análise dos resultados experimentais	11
7.2 Comparativo de custos.....	12
8. CONCLUSÕES.....	13
8.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I	16
APÊNDICE II	17
ANEXOS.....	18

1. INTRODUÇÃO

O Polietileno tereftalato (PET) é um polímero termoplástico da família dos poliésteres desenvolvido em 1941 pelos químicos ingleses Winfield e Dickson (BELLIS, 2005). Em 1973, o processo de injeção e sopro com biorientação, desenvolvido pela Du Pont, introduziu o PET como matéria prima na fabricação de garrafas, o que revolucionou o mercado de embalagens, principalmente no ramo de bebidas carbonatadas. A introdução da embalagem de PET no Brasil trouxe, em 1988, primeiramente na indústria têxtil, indiscutíveis vantagens à indústria e ao consumidor em razão da diminuição do custo de produção, porém, também trouxe consigo o desafio de sua reciclagem, discutida intensamente a partir do século XXI. A problemática do lixo na sociedade brasileira evidencia os plásticos, um de seus principais componentes; e dentro desse universo, o PET, um dos principais polímeros dessa família.

Segundo tabela referente ao tempo de degradação de materiais, divulgada pela Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, garrafas plásticas podem levar mais de 500 anos para degradarem-se. Um estudo publicado em 2007, pelo *Earth Policy Institute*, dizia que os EUA produziam cerca de 29 bilhões de garrafas de água por ano, envolvendo aproximadamente 17 milhões de barris de petróleo neste processo produtivo. Dados do Fórum Econômico Mundial de Davos, realizado em 2016, afirmam que US\$ 80 a 120 bilhões em embalagens plásticas são perdidos anualmente, também estimando que os oceanos terão mais plásticos do que peixes (em massa) até 2050. São inúmeros os dados preocupantes sobre o tema: segundo a UNEP, de 60% a 80% de todo o lixo no mar é plástico; o seu estudo "*Valuing Plastic*" disserta que o custo dos prejuízos ambientais relacionados a ele ultrapassa os US\$ 75 bilhões anuais, sendo 30% desse valor das emissões de gases do efeito estufa e da poluição do ar causadas na fase de produção. Estudos também indicam que mais de 95% do lixo nas praias brasileiras é composto por plástico, como uma das principais conclusões de um monitoramento realizado de 2012 até 2018, pelo Instituto Oceanográfico da USP em parceria com o Instituto Plastivida. Esses estudos servem para comprovar a gravidade da temática dos plásticos como agentes nocivos ao nosso meio ambiente.

Felizmente, a cadeia de reciclagem brasileira está em plena ascensão, e possui um importante papel social no país, já que pessoas, cooperativas e comunidades carentes fazem da coleta e venda de materiais recicláveis a sua principal, e em muitos casos, única fonte de renda. Esse trabalho é essencial para que a maior parte desse material seja reutilizada, e não despejado em locais inapropriados. Segundo dados da associação CEMPRES, o Brasil, em 2011, já figurava como segundo maior reciclador PET do mundo (ver Tabela 1.1). Em relação a outros materiais, como o alumínio, no mesmo ano, o índice de reciclagem brasileiro já chegava a 98,3%, ultrapassando o Japão (92,6%), a Argentina (91,1%) e os Estados Unidos (65,1%).

Tabela 1.1. Maiores recicladores de PET.

País	PET Reciclado (%)
Japão	79,9
Brasil	59
Austrália	42,3
Argentina	34
EUA	29,3

A reciclagem de embalagens PET passou de 35% em 2002 para 58,9% dez anos depois. Com a crise econômica nacional em 2014, a quantidade bruta e relativa de plástico reciclado apresentou uma queda (51% em 2015), segundo a ABIPET. Ainda não foram realizados novos censos desde 2015, mas estima-se que esse índice tenha voltado a crescer nos últimos dois anos. A Figura 1.1 apresenta a quantidade de PET reciclado no Brasil ao longo dos últimos anos.

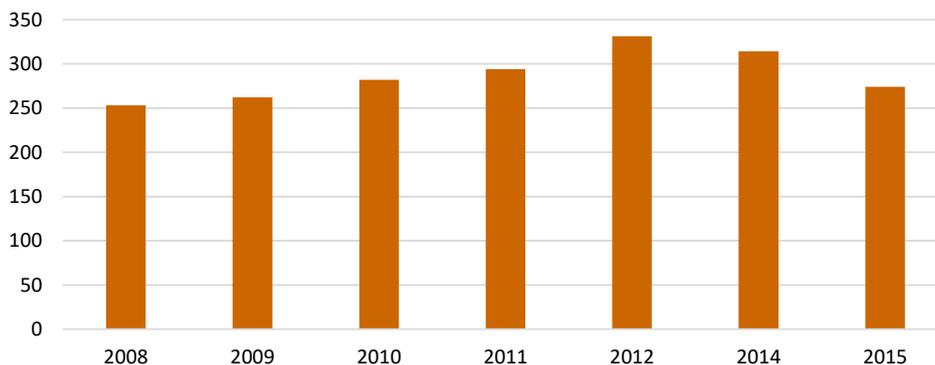


Figura 1.1. Kiloneladas de PET reciclado no Brasil.

O potencial do material reciclado é amplamente conhecido, mas seu aproveitamento, de fato, ainda é pequeno. A análise da Figura 1.2, rapidamente atesta a baixa utilização do material em setores, como por exemplo, o da construção civil. Facilmente identificam-se campos da indústria menos expressivos, sob o ponto de vista econômico, utilizando mais intensivamente o material reciclado; este nem figurando na listagem. A indústria têxtil, embalagens e resinas concentram atualmente cerca de 80% do aproveitamento. Derivações do material podem oferecer diversas soluções em edificações e imóveis, quando analisados e considerados seus subprodutos.

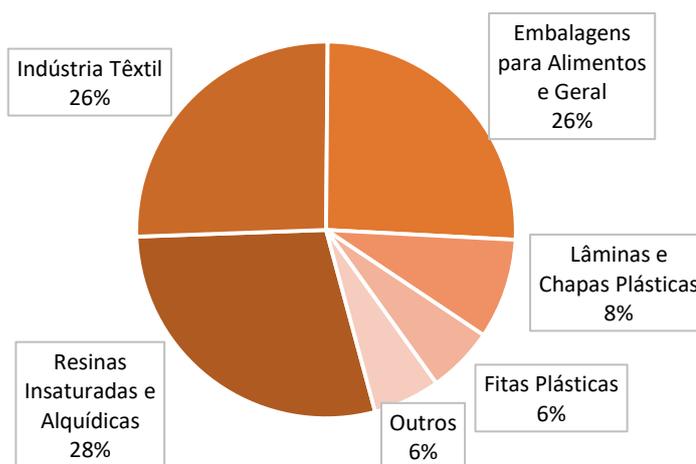


Figura 1.2. Destino final do PET reciclado no Brasil.

A lã de PET, produto resultante da reciclagem do polímero, tem ainda aparecido de forma discreta em estudos acústicos e como opção comercial no mercado da construção civil, porém demonstra um alto potencial de aplicação devido a suas características termoacústicas. O material pode ser usado em diversas soluções, é um produto da reciclagem e também 100% reciclável, não exige água durante o seu processo produtivo, tampouco resinas voláteis.

Para cada m² de parede revestida com a lã de PET (densidade 30kg/m³ e 50mm de espessura) em paredes do sistema *drywall* na construção civil, por exemplo, aproximadamente 100 garrafas PET de água (500ml) são utilizadas; e conseqüentemente retiradas da natureza. Neste estudo serão abordados os atributos referentes à absorção sonora desse material. A gradativa substituição de materiais não tão solidários ao meio ambiente vem ao encontro de outros focos da chamada “Engenharia Sustentável”: rever os métodos produtivos tradicionais e propor soluções alternativas, sustentáveis, aos métodos de manufatura, sem comprometer a eficiência e segurança dos processos; o que parece ser uma das principais virtude da lã.

2. OBJETIVO

Esse trabalho tem o propósito de apresentar um estudo sustentável orientada e discorrer sobre uma maior utilização da lã de PET, avaliando principalmente sua eficiência em termos técnicos, analisando de forma comparativa, com outros materiais comerciais, seus atributos para fins de absorção sonora obtidos em ensaios experimentais. Ademais, esses resultados serão acrescidos das características dos materiais, dos benefícios sustentáveis que o mercado em torno da lã de PET pode proporcionar, da eficácia e ineficácia em aplicações específicas, e do seu custo, como informações chave para uma análise final sobre a possibilidade ou não desta substituir comercialmente os materiais tradicionais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o período de 1868-1919, um físico e Professor da Universidade de Harvard, Wallace Clement Sabine, realizou os primeiros estudos da chamada acústica arquitetônica moderna, tendo seus estudos publicados após a sua morte, em 1922, pela Harvard University Press. Sabine foi o primeiro a usar medidas quantitativas para explicar fenômenos de suma importância para o estudo do tratamento acústico de interiores, como tempo de reverberação, transmissão e absorção sonora. Seus métodos científicos foram aplicados e experimentados durante dois anos no desafio que recebeu em projetar e reformar o Symphony Hall, de Boston, considerado até hoje uma das duas melhores salas acústicas de concertos do mundo.

Em 1871, John William Strutt, conhecido como Lord Rayleigh, publica "The theory of sounds", onde organiza a teoria de vibrações, introduz o conceito de impedância acústica, e estuda o problema da propagação das ondas de som e o limite de audição. Em 1896 apresentou os primeiros estudos referentes à propagação e atenuação sonora em meios porosos. Em maio de 1977, Seybert e Ross publicaram o artigo "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique" na "The Journal of the Acoustical Society of America" explicando uma técnica experimental para medição de propriedades acústicas normais. Neste estudo, foram apresentadas as expressões para impedância acústica normal e coeficiente de reflexão sonora em tubo de impedância. Esse estudo foi utilizado para desenvolver os procedimentos experimentais descritos na norma ISO 10534-2 (1998), que possibilita a obtenção do coeficiente de absorção sonora de materiais, parte essencial deste trabalho. Bodén e Abom, em 1986 e 1988, apresentaram alguns indicativos práticos para minimizar os erros do método de medição, definindo em seus estudos uma faixa de frequência em que os experimentos devem ser realizados.

Em um contexto mais amplo, o século XX é conhecido por ter sido palco de um desenvolvimento nunca antes visto em diversas áreas do conhecimento humano, não só dentro do escopo do estudo de acústica. No entanto, esse avanço gerou uma exploração predatória de recursos naturais para suprir as necessidades de uma sociedade cada vez mais consumista. Aliado a isso, observou-se uma crescente produção de lixo e problemas com poluição. Esse cenário questionou a sociedade sobre até quando o planeta sustentar-se-ia sem novos padrões de vida e práticas conscientes produtivas e, em 1992, o conceito de sustentabilidade foi introduzido pela primeira vez, na "Unit Nations Conference on Environment and Development", no Rio de Janeiro.

Valle (2002) defendeu que desenvolvimento sustentável "significa atender as necessidades da geração atual sem comprometer o direito de as futuras gerações atenderem as próprias". O reaproveitamento de recursos, a reciclagem e o empreendedorismo sustentável passam a ser, então, temas importantíssimos para garantir a preservação da vida no planeta. Dentro do escopo da ciência acústica, esses conceitos refletem na busca e desenvolvimento de materiais que atendam os padrões de qualidade e eficiência exigidos pela sociedade, em termos de tratamento sonoro, mas que também sejam produtos da reciclagem, que sejam ainda reutilizáveis e/ou utilizem o mínimo de recursos naturais. Esses parecem ser os principais atributos da lã de PET, que será o foco de estudo deste trabalho.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir serão apresentados alguns breves conceitos que serão fundamentais para a contextualização e entendimento deste trabalho:

4.1. Comportamento de uma onda sonora ao encontrar um obstáculo

Quando uma onda sonora encontra uma barreira, parte dessa energia incidente total é refletida e parte dela é absorvida, conforme a Figura 4.1. Uma fração dessa energia absorvida é dissipada estruturalmente e o restante é transmitido. Materiais chamados de isolantes acústicos possuem um baixo coeficiente de transmissão sonora. Já os considerados absorvedores, são aqueles com alto coeficiente de absorção sonora.

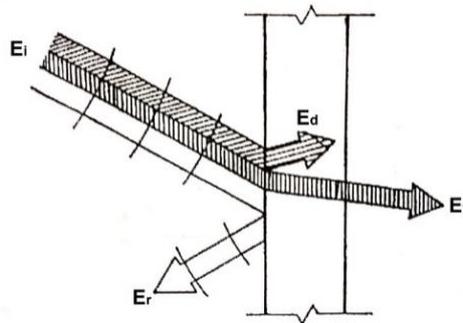


Figura 4.1. Balanço energético do som (adaptado de Miguel e Tamagna, 2007).

Onde:

E_i é a energia incidente total

E_t é a energia transmitida

E_d é a energia dissipada

E_r é a energia refletida

4.2. Absorção sonora e coeficiente de absorção sonora (α)

Absorção sonora diz respeito à atenuação da intensidade sonora de uma onda no momento em que essa encontra uma barreira ou atravessa um meio distinto àquele em que se propagara. A causa desse fenômeno pode ser atribuída a dois mecanismos principais: a conversão da energia da onda sonora em energia térmica, conhecida como dissipação térmica que ocorre pelas reflexões da onda sonora internamente aos poros ou fibras do material, e ao atrito viscoso próximo de sua superfície. Está diretamente ligada ao coeficiente de absorção sonora, que é dado pela equação abaixo:

$$\alpha = \frac{E_t + E_d}{E_i} \quad (4.1)$$

Um coeficiente de absorção (α) próximo de 1 indica que a soma da energia transmitida e dissipada internamente no material é próxima da energia total incidente. Ou seja, o material refletiu muito pouco da sua energia, sendo considerado um absorvedor sonoro. Um coeficiente de absorção próximo de zero indica que essa soma é muito pequena quando comparada à energia total que incidiu superficialmente. Conclui-se, então, que o material refletiu a maior parte de sua energia. Nesse caso, o material não é um bom absorvedor acústico, ao menos para a faixa de frequência em análise. Esse índice é um dos pontos chave para o desenvolvimento desse trabalho, onde se verificará a absorção sonora de alguns materiais.

4.3. Materiais absorventes acústicos

São os materiais utilizados para reduzir a reflexão das ondas sonoras e o nível (ou tempo) de reverberação num dado ambiente. Portanto, eles atuam no tratamento acústico, sendo, muitas vezes, erroneamente descritos como isolantes acústicos. Os materiais considerados como absorvedores sonoros têm coeficiente de absorção sonora $\alpha > 0,5$; conseqüentemente são materiais que refletem menos da metade da energia total incidente. A capacidade de absorção sonora de cada material depende da frequência de incidência das ondas. Os sistemas de materiais absorvedores sonoros são distribuídos em três grandes categorias, que atuam em distintas faixas de frequências: os materiais porosos e fibrosos, os ressoadores e as membranas.

Os materiais porosos e fibrosos, que serão objetos desse trabalho, são mais eficazes para absorção sonora de média-alta frequência, acima de 1000Hz. Essa eficácia depende muito das características estruturais do material, tendo que haver um equilíbrio entre a concentração das fibras, número e tamanho dos poros. Nos materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos interstícios das fibras, fazendo-as vibrar juntamente com o ar, dissipando-se em energia térmica. Para um material com alta concentração de fibras, por exemplo, as ondas sonoras terão baixa penetração estrutural, perdendo-se pouca energia por dissipação térmica. No caso dos materiais porosos, a energia incidente entra pelos poros e é parcialmente dissipada, transformando-se em energia térmica, principalmente por reflexões múltiplas e por atrito viscoso entre o ar presente no interior dos poros e a estrutura do material. A densidade e a espessura dos materiais são fatores que influenciam diretamente na sua eficiência acústica. Um gráfico ilustrando como o coeficiente de absorção sonora varia em função da espessura, de acordo com Bistafa (2006), pode ser consultado nos anexos deste trabalho. São exemplos de materiais porosos as espumas acústicas de poliuretano e de poliéster; exemplos de materiais fibrosos: a lã de PET, a lã de rocha e a lã de vidro.

Os ressoadores atuam de forma mais eficiente com frequências médias, entre 300 e 1000Hz. São sistemas formados por cavidades de paredes rígidas dispostas de uma estreita abertura. A frequência de ressonância depende do volume dessas cavidades e de suas características geométricas. Já os materiais que integram a família das membranas são mais sensíveis, atuam em baixas frequências, entre 75 e 300Hz. Absorvem parte da energia sonora através da vibração estrutural e da perda de calor por fricção de suas fibras quando o sistema entra em regime de flexão. A Figura 4.2 apresenta, de forma genérica, os intervalos representativos de frequência para cada uma dessas categorias.

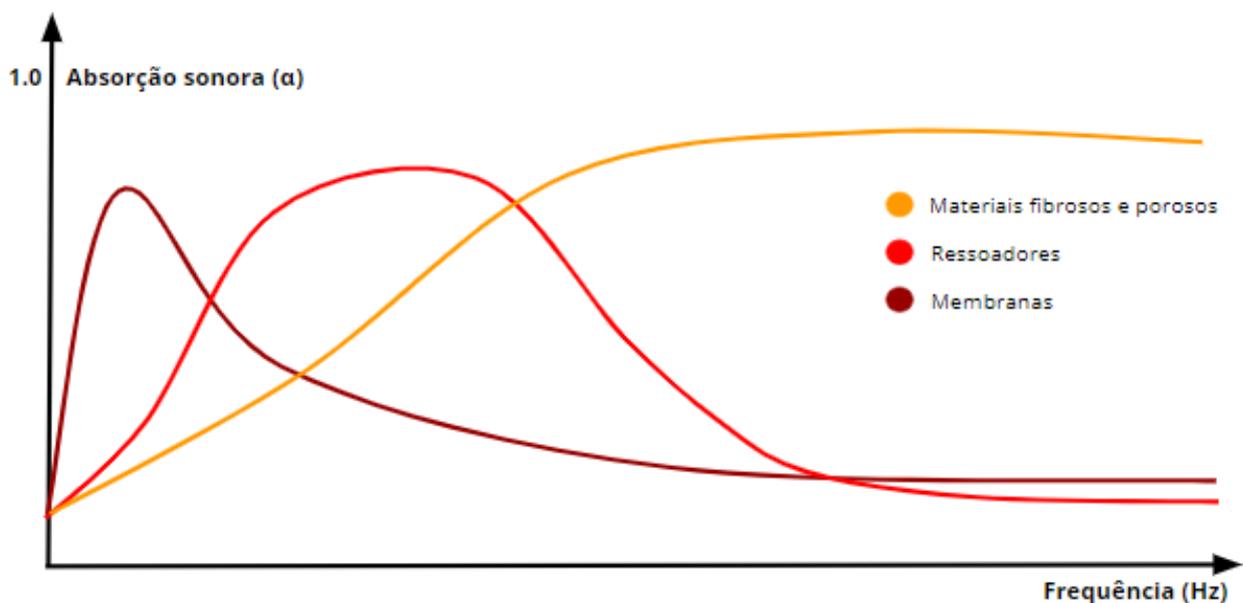


Figura 4.2. Intervalo representativo para categorias de materiais absorvedores.

4.4. Medição de absorção sonora por incidência normal - ISO 10534-2

São dois os métodos conhecidos para a medição da absorção sonora de materiais: A medição via câmara reverberante, descrita pela ISO 354, que se baseia na medição de incidência sonora difusa; e o tubo de impedância, descrito pelas ISO 10534-1 e ISO 10534-2, que mede a impedância de superfície por incidência sonora normal.

Em comparação com a ISO 354, os experimentos em tubo de impedância são consideravelmente mais simples de serem realizados, pois não exigem amostras de grande escala, tampouco um ambiente especial para cada análise. Pela ISO 10534-2 também é possível realizar medidas rápidas e perfeitamente reproduzíveis, com um menor tempo desperdiçado em função do *setup* experimental. Ambos são métodos bem consolidados e muito utilizados para caracterização acústica de materiais. Esses métodos se baseiam na relação da impedância sonora das superfícies de materiais com suas propriedades físicas, como porosidade, resistência ao escoamento de ar, elasticidade e densidade.

Nesse trabalho será abordado o método descrito na ISO 10534-2, que se diferencia da ISO 10534-1 pela alta rapidez de resposta inerente a sua técnica de medição: nela, ondas planas são geradas no tubo de impedância e a decomposição do campo de interferência é obtida pela medição da pressão sonora em microfones acoplados próximo às amostras. Calcula-se, então, a função de transferência complexa acústica dos sinais, a absorção sonora normal e a impedância acústica do material. O sistema é constituído por um tubo, geralmente cilíndrico, onde em uma das extremidades encontra-se uma fonte sonora responsável pela amplificação do sinal gerado. Na outra extremidade encontra-se a amostra na qual deseja-se analisar as propriedades, protegida por uma superfície rígida. Microfones são acoplados na superfície do tubo, próximos ao material, na qual medem a pressão sonora composta (composição da pressão sonora incidente e refletida) e enviam para o analisador de sinais, conforme a Figura 4.3. Por fim, um computador dotado de algum *software* compatível recebe as informações do analisador de sinais e processa de acordo com uma rotina de cálculo.

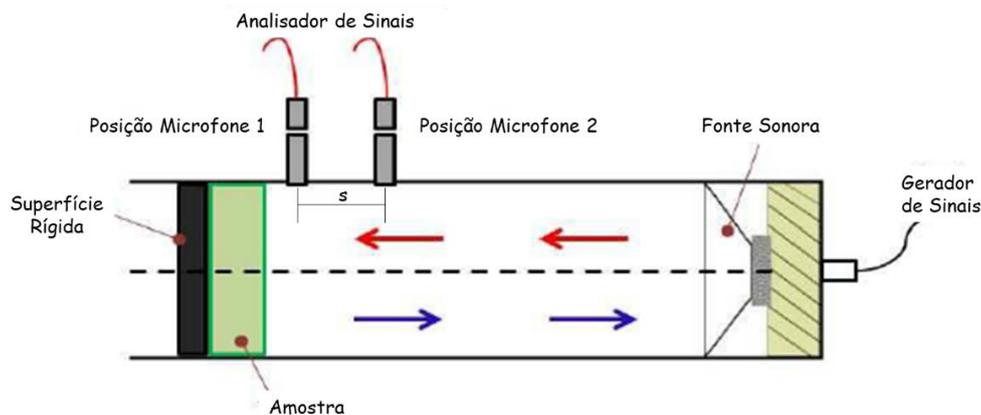


Figura 4.3. Diagrama esquemático de um tubo de impedância (adaptado de Sambu *et al.*, 2015).

O diâmetro (d) e o espaçamento entre os microfones (s) são parâmetros importantes para definição da faixa de frequência atendida pelo ensaio. Mais precisamente, d determina a frequência máxima, ou de corte, do experimento, conforme a equação abaixo:

$$f_c = \frac{1,84c_0}{\pi d} \quad (4.2)$$

onde c_0 [m/s] é a velocidade do som no interior do tubo, que é dada pela equação 4.3, na qual T [K] é a temperatura do ar no interior do tubo.

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \quad (4.3)$$

Como recomendação, a distância entre microfones, s , deve ser de até 45% do comprimento de onda de maior frequência (λ_u). Para que se evite a possibilidade de medir a mesma pressão sonora, principalmente numa zona de baixas frequências, s deve ser maior que 5% do comprimento de onda de menor frequência de interesse (λ_l). Compilando-se essas restrições, chega-se na inequação abaixo:

$$0,05\lambda_l < s < 0,45\lambda_u \quad (4.4)$$

Bóden e Abom (1988) apresentaram alguns indicativos práticos para reduzir os erros dos métodos de medição. Segundo o estudo, a relação sobre a distância entre microfones e faixas de frequência deve ser dada pela inequação 4.5:

$$\frac{0,1c_0}{2s} < f < \frac{0,8c_0}{2s} \quad (4.5)$$

O método é dado a partir da função de transferência $H(f)$ entre os microfones, sendo $P_1(f)$ e $P_2(f)$ as pressões compostas coletadas pelos microfones 1 e 2, no domínio da frequência:

$$H(f) = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \quad (4.6)$$

onde $P_1(f)$ e $P_2(f)$ são as pressões coletadas pelos microfones 1 e 2, respectivamente, no domínio da frequência. Uma calibração da função de transferência visando reduzir as características de amplitude e diferença de fase entre os microfones é feita na sequência. Trocam-se as posições entre os microfones e repete-se a medição com as posições invertidas, resultando em uma nova função de transferência. A calibração é obtida com a seguinte função de transferência calibrada $H_{12}(f)$, dada pela Equação 4.7:

$$H_{12} = [H(f) \cdot H^*(f)]^{0,5} \quad (4.7)$$

O coeficiente de absorção sonora deriva do coeficiente de reflexão r . Este, por sua vez, pode ser obtido a partir da função de transferência calibrada $H_{12}(f)$, junto a propriedades como o número de onda no ar, k_0 , e a distância entre os microfones:

$$r = \frac{H_{12} - e^{-ik_0s}}{e^{ik_0s} - H_{12}} e^{2k_0s} \quad (4.8)$$

sendo k_0 o número de onda complexo no ar, normalizado pela Equação 4.9:

$$k_0 = \left(\frac{w}{c_0}\right) - j0,0194 \left(\frac{\sqrt{f}}{c_0d}\right) \quad (4.9)$$

em que f é a frequência em Hertz e $w = 2\pi f$ a frequência angular em análise. A partir do coeficiente de reflexão r , pode-se obter outra característica acústica denominada impedância de superfície Z_s do material, através da equação:

$$Z_s = \frac{1 - r}{1 + r} \quad (4.10)$$

Pode-se, então, a partir do coeficiente de reflexão sonora complexo, estimar o coeficiente de absorção por incidência normal, pela equação:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (4.11)$$

5. METODOLOGIA

Para a abordagem técnica relativa à absorção acústica de alguns dos materiais apresentados neste trabalho, o caráter metodológico foi experimental. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em tubo de impedância, conforme a ISO 10534-2. Foram ensaiadas amostras de lã de PET, foco deste trabalho; amostras de um outro exemplar de material fibroso, representado pela lã de rocha; e amostras de um material poroso, representado pela espuma de poliuretano. Todos esses exemplares tinham densidades semelhantes: entre 30 e 33kg/m³, para melhores efeitos comparativos. O diferente número de amostras para cada material está associado à homogeneidade dos materiais. Após, os dados foram tratados e analisados comparativamente.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1. Materiais

Todos os materiais escolhidos para os ensaios possuíam densidades entre 30 e 33kg/m³ e espessura de 50mm para um estudo comparativo mais lúdimo possível. Esses painéis foram adquiridos em pontos comerciais em Porto Alegre, com exceção das amostras de Lã de PET (Figura 6.1), que foram doadas por um fabricante nacional. Para a análise técnica da absorção sonora via tubo de impedância foram escolhidos os seguintes materiais:

6.1.1. Lã de PET



Figura 6.1. Placas (painéis) de lã de PET.

Material obtido através da reciclagem do PET, que já retirou bilhões de garrafas da natureza. É obtido através do processamento do plástico, que passa por diversas etapas: é seco, moído, fundido, filtrado, extrudado, estirado, termofixado, cortado e drenado novamente. O material tem um vasto campo de aplicação, podendo ser utilizado em instalações industriais, comerciais e residenciais. Além das propriedades termoacústicas, a lã é hipoalérgica, sua vida útil pode passar dos 100 anos, apresentando ainda, as seguintes características:

- | | |
|------------------------------|--|
| 1) Autoextinguível | 6) Indeformável com o tempo |
| 2) Simples instalação | 7) Eficiente, ecológica e reciclável |
| 3) Ótimo custo benefício | 8) Não decanta com vibração estrutural |
| 4) Resistente a umidade | 9) Sem possui adição de resinas |
| 5) Alta resistência mecânica | 10) Resistente a microorganismos |

Comercialmente, são encontradas mantas com densidades entre 5 e 35kg/m³ e espessuras de até 100mm. Dez amostras com diâmetro de 26mm (diâmetro interno do tubo de impedância) foram preparadas para a análise.

6.1.2. Lã de Rocha

Material obtido através do processamento de rochas basálticas extraídas da natureza com adição de fibras minerais em menor quantidade, que são superaquecidas, posteriormente aglomeradas com resinas e transformadas em filamentos para adquirir a forma final (Figura 6.2). O material é encontrado em diversas densidades, desde 30kg/m^3 até 160kg/m^3 , em diversas espessuras. É usado em diversas aplicações termoacústicas, extremamente eficiente em termos de absorção sonora, incombustível, facilmente moldável, porém exige alguns cuidados com o manuseio, assim como a lã de vidro. Pode causar irritação na pele, nariz e olhos de quem estiver a instalando, ou até mesmo reações alérgicas e/ou respiratórias.



Figura 6.2. Placas de lã de rocha.

Devido a sua heterogeneidade estrutural macroscópica em baixas densidades, para que os resultados dos experimentos sejam confiáveis, 10 amostras do material também foram separadas para a análise, no diâmetro do tubo de impedância: 26mm.

6.1.3. Espuma/Manta de Poliuretano

É o material-base de diversos produtos comerciais no mercado de tratamento acústico. Tem absorção sonora comprovada por diversos estudos. É flexível e apresenta uma estrutura homogênea, mesmo em baixas densidades. Contudo, é um material que tem fácil ignição e propagação de chama, sendo um dos responsáveis por diversas tragédias recentes em locais fechados com grande concentração de pessoas. Quando em chamas, tem rápida taxa de desenvolvimento de calor e fumaça, liberando gases tóxicos como cianeto, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Atualmente, está sendo acrescida, em sua composição, de agentes de redução de propagação de chama, como forma de resolver esse problema.



Figura 6.3. Placas de espuma de poliuretano.

Como o poliuretano, diferentemente dos materiais anteriores, apresenta uma estrutura macroscópica homogênea, mesmo em baixas densidades, apenas cinco amostras do material foram separadas para a análise. Esses exemplares, assim como os anteriores, foram cortados no diâmetro interno do tubo de impedância: 26mm.

A Figura 6.4 mostra as amostras dos três materiais ensaiados.

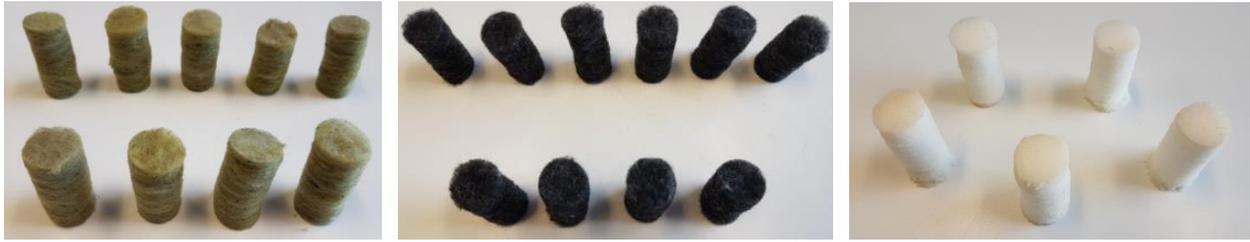


Figura 6.4. Amostras dos três materiais preparadas para a análise.

A Tabela 6.1 apresenta um resumo dos materiais e quantidades de amostras utilizadas nos ensaios realizados. Ressalta-se que materiais com características dimensionais e estruturais semelhantes foram selecionados. Essa paridade contribui para uma equitativa e coerente análise de desempenho.

Tabela 6.1. Resumo dos conjuntos de amostras analisados.

Material	Quantidade	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
Lã de PET	10	30	50
Lã de Rocha	10	32	50
Espuma Acústica (Poliuretano)	5	33	50

6.2. Tubo de impedância e aparato experimental

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina. A Figura 6.5 ilustra o tubo de impedância e a configuração dos equipamentos utilizados pelo laboratório para executar os ensaios, conforme a ISO 10354-2. As especificações dos equipamentos são dadas na Tabela 6.2. O tubo possui um diâmetro interno de 26mm e um espaçamento entre microfones de 23,6mm, o que lhe confere, segundo a Equação 4.4 e a inequação 4.7 uma frequência máxima de corte de 7665,55Hz e confiança de estudo (com mínimos erros) quando analisadas frequências de 720 a 5767Hz. Os dados foram coletados via *software* Pulse. Os *outputs* desse programa foram abertos e tratados em um *script* no MATLAB para tratamento dos dados, gerando os resultados dispostos na seção 7.1.

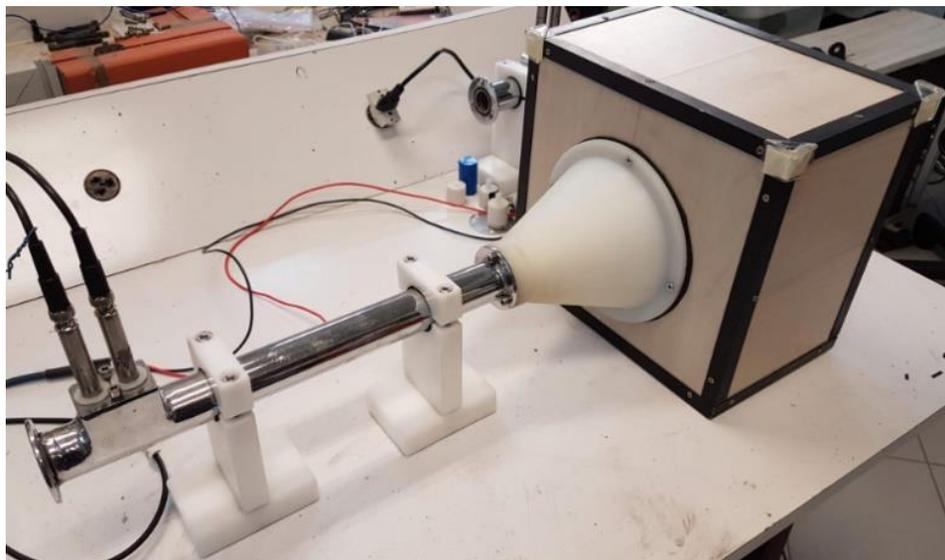


Figura 6.5. Configuração do tubo de impedância – LVA, UFSC.

Tabela 6.2. Configuração e especificação do setup experimental.

Equipamento	Descrição/Especificação
Analizador de Sinais	B&K Pulse (<i>software</i> LabShop)
Tubo de Impedância	Diâmetro interno de 26mm
Amplificador	B&K 2718
Microfones (2)	½" B&K modelo 4189-A-021
Calibrador de Microfone	B&K modelo 4231

6.3. Preparação das amostras

As amostras foram cortadas manualmente com auxílio de um instrumento denominado “corta-amostras”, ilustrado na Figura 6.6 (a). Esse instrumento, assim como o porta-amostras Figura 6.6 (b), tem o mesmo diâmetro interno do tubo de impedância. O corte das amostras foi feito com cuidado para que se obtivessem amostras alinhadas, com menor rugosidade e descontinuidades de superfície, permitindo um encaixe adequado no porta-amostras. Após o corte, as amostras são encaixadas e alinhadas com a face do porta-amostras, conforme a Figura 6.6 (b), que é fixado em uma das extremidades do tubo.



Figura 6.6 (a): “corta-amostras”.



Figura 6.6 (b): “porta-amostras”.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Análise dos resultados experimentais

Exemplos das curvas obtidas para cada amostra de material podem ser consultados no Apêndice I deste trabalho. Com relação à lã de PET, os ensaios comprovaram sua eficiência em termos de absorção sonora, garantindo um coeficiente de absorção sonora superior a 0,75 a partir de aproximadamente 1800Hz, o que comprova a efetividade do material como absorvedor sonoro para o mercado de tratamento acústico. Ressalta-se que o intervalo de confiança de medição, conforme postulado na seção descritiva do procedimento experimental é de 720 a 5767Hz. A lã de Rocha, analisada sob as mesmas condições, a partir de 800Hz já apresentava desempenho extremamente positivo em relação a sua capacidade de absorção, com coeficiente de absorção sonora de aproximadamente 0,8. Para sinais superiores a 1100Hz o material apresentou um índice de absorção superior a 0,9, o que confirma o incontestável destaque que este composto fibroso possui no que diz respeito a absorção sonora. A espuma de poliuretano foi o material que apresentou a maior oscilação média em termos do coeficiente de absorção sonora para médio-altas frequências. Contudo, também apresentou um desempenho extremamente favorável: semelhantemente à lã de rocha, o material, quando testado por sinais com frequências de 500Hz apresentou uma absorvidade de 0,6. Acima de 1400Hz a espuma apresentou um coeficiente de absorção sonora superior a 0,8 para praticamente todas as frequências de teste.

O gráfico da Figura 7.1 ilustra a média de todas as medições dos três materiais para que seja possível realizar uma análise visual comparativa. Com base nos dados apresentados os três materiais confirmaram seus atributos em termos de absorção sonora, ainda que visivelmente haja diferença de efetividade. A lã de rocha foi o material que apresentou o maior coeficiente de absorção, tanto para baixas como médias e altas frequências.

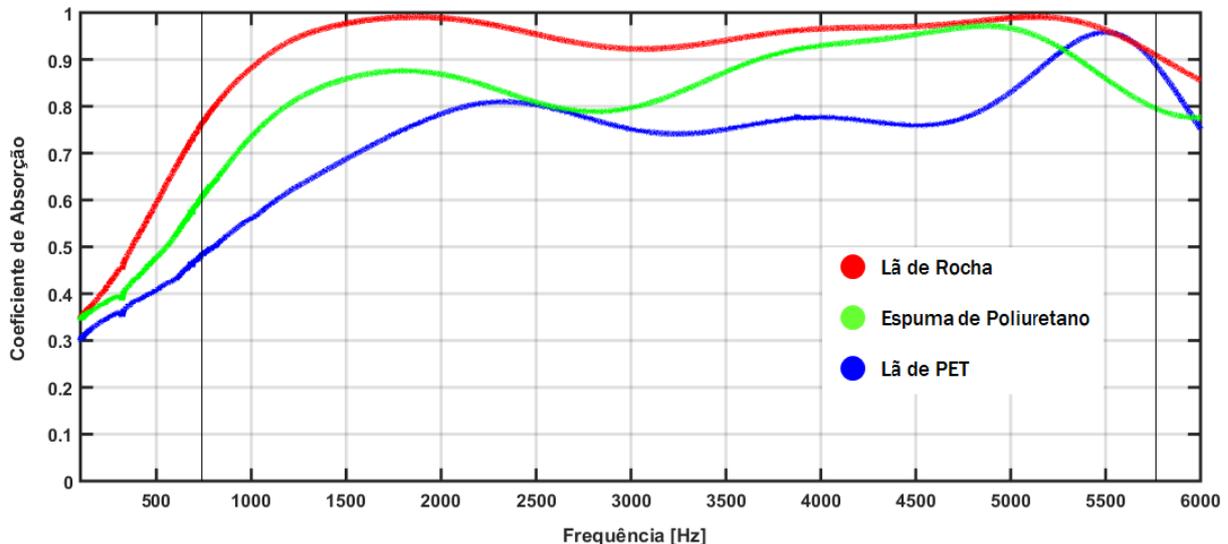


Figura 7.1. Médias das curvas de absorção sonora para os três materiais analisados.

Ressalta-se que resultados aqui dispostos são referentes às condições específicas do ensaio realizado. Condições, aqui, referem-se tanto à instrumentação quanto à natureza das amostras. Cada material carrega consigo as particularidades de seu processo produtivo. Segundo a norma ISO 10534-2, espera-se uma incerteza de 1% nos valores obtidos em relação ao coeficiente de absorção sonora.

7.2. Comparativo de custos

Uma breve análise de custo dos três materiais foi realizada na região de Porto Alegre. Esses materiais são amplamente usados em arranjos de isolamento de paredes e sistema de divisórias *drywall*, no setor de construção civil, sendo comercializados usualmente como placas nas dimensões de 1,2x0,6m. Portanto, o custo foi estimado em relação a essa metragem (0,72m²). Os menores valores encontrados, em lojas físicas e/ou comércio eletrônico local, estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Custo dos materiais.

Material	Tamanho do Painel	Tipo de Fornecimento	Custo
Lã de PET	0,72m ²	Fabricante	R\$ 14 - R\$ 18
Lã de PET	0,72m ²	Representante Comercial	R\$ 34,00
Lã de Rocha	0,72m ²	Representante Comercial	R\$ 30,00
Espuma de Poliuretano*	0,72m ²	Representante Comercial	R\$ 180,00

* Produto não encontrado nas dimensões 1,2x0,6

A lã de PET ainda tem poucos representantes comerciais na região, quando comparada com fornecedores de lã de rocha e espuma de poliuretano. O material é muitas vezes comercializado diretamente com o consumidor final, pelo menor valor consultado, como disposto na Tabela 7.1. Neste primeiro valor, onde consta o custo do produto fornecido diretamente pelo fabricante nacional, já está sendo considerado o ICMS de 12% para o estado do Rio Grande do Sul.

8. CONCLUSÕES

Como disposto na seção anterior, ainda que a lã de PET não tenha apresentado os melhores índices de absorvidade sonora, os ensaios comprovaram que o material apresenta sólidos atributos técnicos para essa finalidade. Um coeficiente de absorção sonora de 0,75 a 0,8, como o apresentado pela lã dentro do intervalo crítico, atende as necessidades comuns no que diz respeito à atenuação sonora. A escolha do material para uma aplicação específica, na prática, leva em consideração atributos diversos, como a facilidade de instalação, durabilidade, custo, entre outros. Dessa forma, ainda que outros materiais possam, tecnicamente, apresentar melhores resultados que a lã, o material pode convencer o usuário com base em sua identidade e seus diferenciais.

Ela é consideravelmente mais segura que a espuma de poliuretano, por exemplo, por não propagar chama (auto-extinguível) nem emitir gases tóxicos quando exposta a altas temperaturas. Contudo seu maior diferencial é ser resultado da reciclagem do plástico, um dos principais problemas ambientais da nossa sociedade, e fomentar um consumo consciente. Ao contrário da lã de rocha, que depende da extração de rochas do solo para ser produzida, uma maior utilização da lã de PET significa contribuir para preservação e conservação de recursos naturais. A lã incentiva e agrega valor ao mercado da reciclagem, que tem uma função social muito importante, gerando trabalho e renda principalmente em países em desenvolvimento, como o caso do Brasil.

Diversos outros materiais vêm sendo analisados em aplicações acústicas. Recentes trabalhos demonstraram que resíduos da indústria têxtil e moveleira, por exemplo, assim como fibras naturais como de bananeira e coco também podem ser utilizados para fins de absorção sonora. No entanto, a lã reciclada é um material que já vem sendo produzida (ainda que por poucas empresas) em grande escala no país. Assim, o material se apresenta como uma opção realmente viável em termos substitutivos. O seu custo, como visto na seção anterior, já é competitivo quando comparada com os outros materiais, restando uma maior divulgação de seus atributos e de sua eficácia para que se intensifique sua utilização popular.

8.1. Sugestões para trabalhos futuros

A análise por meio do tubo de impedância considera apenas a absorção por incidência sonora normal. Analisar, também, as amostras por meio da ISO 354 (incidência sonora difusa), utilizando a câmara reverberante, poderia fornecer resultados complementares e/ou distintos dos apresentados neste trabalho. Na verdade, há uma quantidade significativa de estudos da lã em câmara reverberante que já indicam uma maior eficiência do material.

Conforme a fundamentação teórica, fatores como a espessura e a densidade dos materiais afetam diretamente sua capacidade de absorção. Porém, esse efeito não se apresenta de forma linear. Uma análise mais completa, fornecendo um mapa de absorção das amostras, seria possível caso diferentes especificações de materiais fossem testadas. Os resultados apresentados neste trabalho são representativos para o tipo e dimensional utilizado.

Alguns estudos indicam que a coloração dos corpos pode exercer influência na sua capacidade de absorção sonora. Seria válido analisar se esse efeito é irrisório ou relevante para o nível de precisão estudado. Como visto na seção de materiais, em procedimento experimental, diferentes colorações de amostras foram selecionadas para este estudo, negligenciando esse efeito.

Por fim, o procedimento de corte manual criou algumas arestas, irregularidades e imperfeições de superfície que podem ter desencadeado ruídos (erros) nas medições. A preparação das amostras com um aparato instrumental mais adequado, como por exemplo fazendo uso de uma instrumentação ou procedimento de corte profissional, minimizaria as chances de erro dessa natureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, p. 9, 1992.

Bistafa, S. R. “**Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**”, Edgard Blücher, Brasil, 2ª e, 2006.

Bodén, H. e Abom, M., “**Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow**”, JASA, vol. 83, nº 6, 1988.

Bodén, H. e Abom, M., “**Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts**”, JASA, vol. 79, nº 2, 1986.

Demarchi, C. A. “**Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: caracterização, produção e absorção sonora**” 2010. 106 fl. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

Formigoni, A. “**Reciclagem de PET no Brasil**”. Dissertação (Mestrado) – UNIP, 2006.

ISO 10534-1:98. “**Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes**” – Part 1: Method using standing wave ratio. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 1996.

ISO 10534-2:98. “**Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes**” – Part 2: Transfer function, Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 1998.

ISO 354:2003 “**Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room**” - Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 2003.

Kulakauskas, F. “**Avaliação do uso de materiais porosos na perda de transmissão de transmissão de painéis duplos**”, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

M. Sambu et al., “**The Acoustical Characteristics Analysis on Different Type of Natural Fibres**”, Applied Mechanics and Materials, Vols. 773-774, pp. 242-246, 2015.

“**Materiais absorvedores**” – Notas de Aula – AUT0278 – Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo FAUUSP, São Paulo.

Mareze, P. H. “**Análise da influência Microgenia na Absorção Sonora de Materiais Porosos de Estrutura Rígida**”, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

Medeiros, Maiara Goulart. “**Valorização do resíduo da lã de rocha através de sua incorporação em matrizes de cimento Portland**”. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

Miguel, L. F.F.; Tamagna, A. “**Tópicos de Acústica Aplicada**” - Notas de Aula de Eng03015 - Acústica Aplicada, Brasil, 1ª edição, 2007.

Pavan, B. B. “**Análise da absorção acústica da fibra de coco em comparação com espuma acústica comercial via tubo de impedância**”. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Portela, M. **“Materiais Acústicos – Conceitos para acústica arquitetônica”** – Notas de Aula, LVA, UFSC

Seybert, A.; Ross, D. **“Experimental determination of acoustic properties using two-microphone random-excitation technique”**, The Journal of the Acoustical Society of America, 1977.

Telles, L. S. **“Análise da absorção acústica da fibra Shoddy em comparação com espuma acústica”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

“Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry”, UNEP, 2014

Valle, Ayro Eyer do. **Qualidade Ambiental 14000**. 8 ed. Senac, São Paulo, 2002

Artigos publicados em sites, estudos e matérias consultadas:

ABIPET - Associação Brasileira da indústria do PET
<http://www.abipet.org.br> – Consulta ao site e ao Censo da Reciclagem em abril de 2019

Bellis, M. **“The History of Polyester”**. Artigo disponível em <https://www.thoughtco.com/history-of-polyester-4072579>

“Bottled Water Boycotts: Back-to-the-Tap Movement Gains Momentum”

Por Janet Larsen - Earth Policy Institute – 2007
<http://www.earth-policy.org/mobile/releases/update68>

CEMPRE – Centro Empresarial para a Reciclagem
<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/8/pet> - Acessado em abril de 2019

“Garrafa PET: da produção ao descarte”

Por Luiz Aires - Acessado em abril de 2019
<https://www.ecycle.com.br/231-reciclagem-de-garrafa-pet>

“Mais de 95% do lixo nas praias brasileiras é plástico, indica estudo”

<http://www.io.usp.br/index.php/noticias/1021-mais-de-95-do-lixo-nas-praias-brasileiras-e-plastico-indica-estudo1> - Acessado em abril de 2019

“Plástico – Nós o criamos. Dependemos dele. Mas ele nos ameaça.”

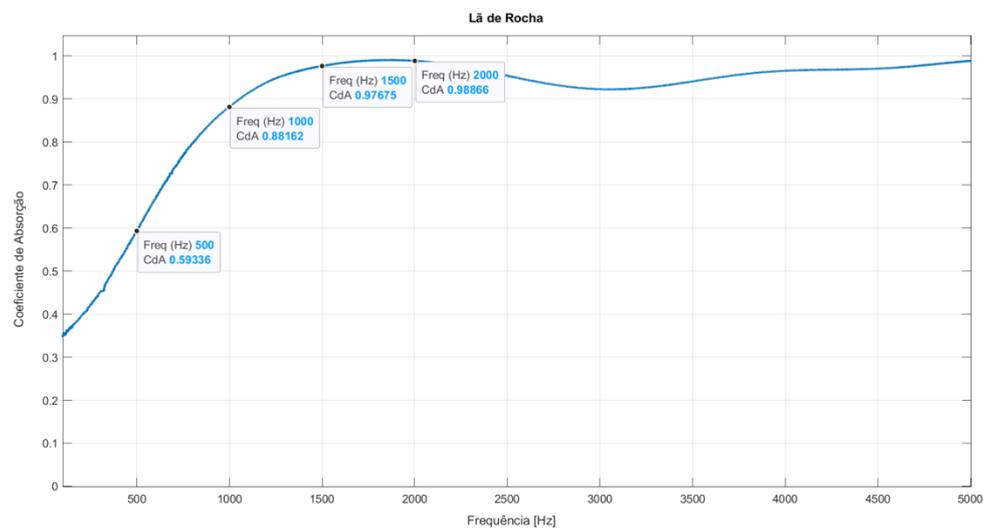
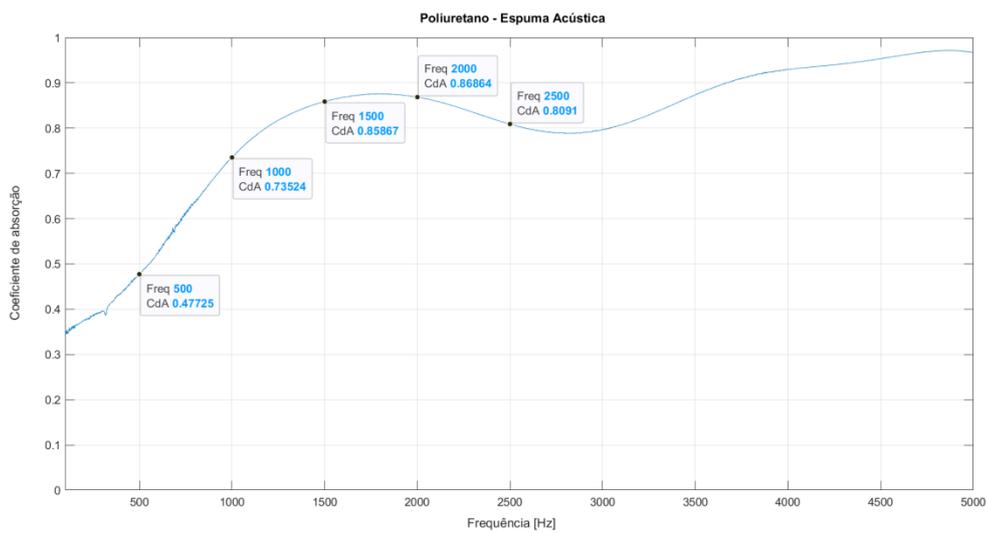
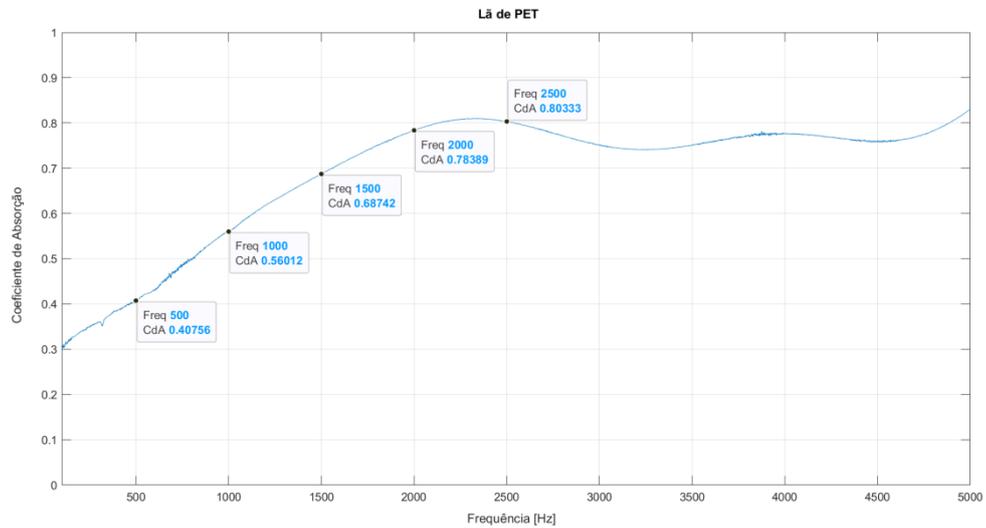
Por Laura Parker – Acessado em abril de 2019
<https://www.nationalgeographicbrasil.com/2018/05/lixo-plastico-planeta-poluicao-lixao-consumo>

“Plástico é o maior desafio ambiental do século XXI, segundo ONU Meio Ambiente”

Amcham Brasil, junho de 2018 - Acessado em abril de 2019
<https://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/plastico-e-o-maior-desafio-ambiental-do-seculo-xxi-segundo-onu-meio-ambiente/>

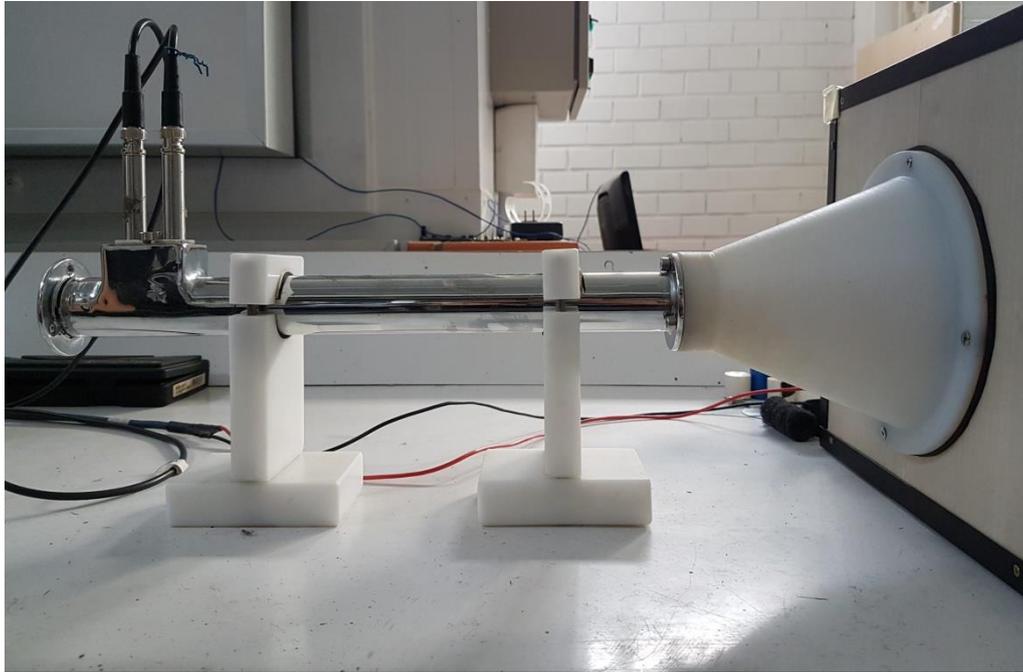
APÊNDICE I

Exemplos das curvas experimentais obtidas para cada amostra de material analisado via tubo de impedância.

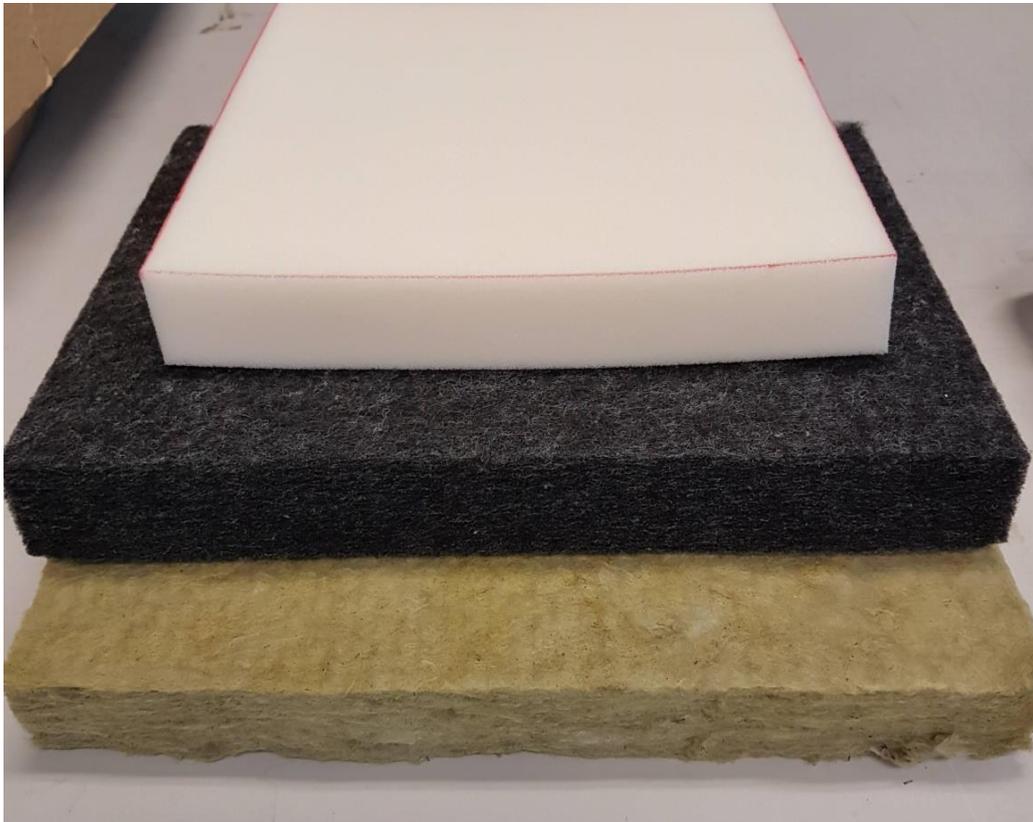


APÊNDICE II

Imagens complementares relativas ao experimento.



Vista frontal do tubo de impedância do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA).



Painéis dos três materiais usados.

ANEXOS

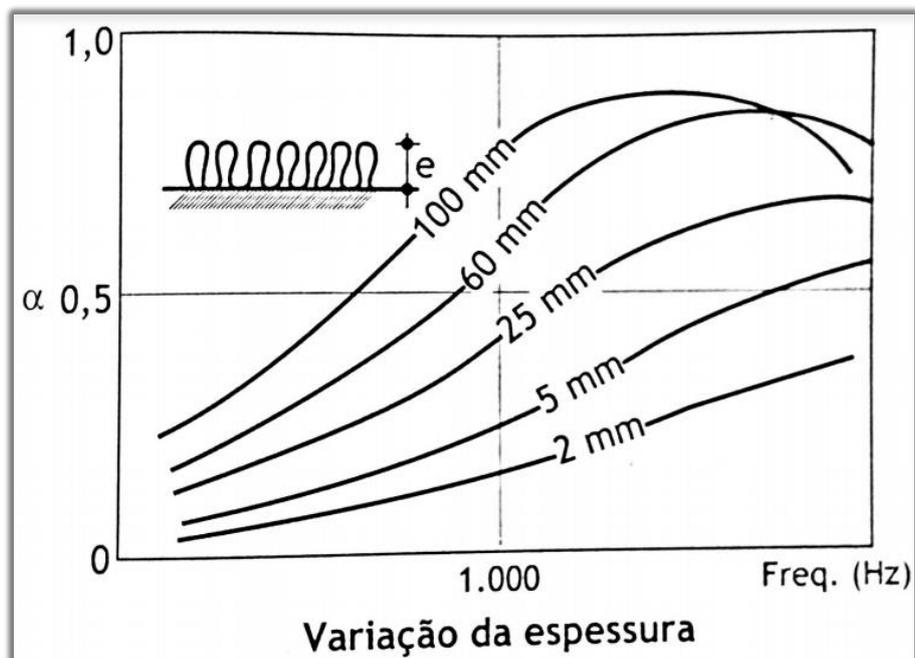
Tabela divulgada pela FEC – UNICAMP:

Tempo de Degradação dos Materiais

<i>Resíduo</i>	<i>Tempo</i>
Jornais	de 2 a 6 semanas
Embalagens de papel	de 1 a 4 meses
Guardanapos de papel	3 meses
Pontas de cigarro	2 anos
Palito de fósforo	2 anos
Chiclete	5 anos
Cascas de frutas	3 meses
Nylon	de 30 a 40 anos
Copinhos de plástico	de 200 a 450 anos
Latas de alumínio	de 100 a 500 anos
Tampinhas de garrafa	de 100 a 500 anos
Pilhas e baterias	de 100 a 500 anos
Garrafas de plástico	mais de 500 anos
Pano	de 6 a 12 meses
Vidro	indeterminado
Madeira pintada	13 anos
Fralda descartável	600 anos
Pneus	indeterminado

Fonte: Grippi 2001, Lixo 2003.

Imagem retirada do livro “Acústica Aplicada ao Controle do Ruído” – Bistafa, 2006:



Valores esperados para α em função da variação da espessura. Fonte: Bistafa (2006)