



ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE NO EXPERIMENTO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA: ISO10534-1:1996

PAULA KAROLINY MESSIAS SCARAMUSSA¹, HAYNNER HEZROM DE SOUSA¹,
ROBERTO OUTA¹, SANDRO DA SILVA PINTO¹, FABIO ROBERTO
CHAVARETTE², APARECIDO CARLOS GONÇALVES³

¹FATEC Lins - Faculdade de Tecnologia de Lins, Departamento Gestão da Qualidade. Brasil

²UNESP - Universidade Estadual Paulista – Dep. Eng., Física e Matemática, Instituto de Química. Brasil

³UNESP - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica. Brasil

(Recibido 16 de septiembre de 2022, para publicación 16 de febrero de 2023)

Resumo – Este trabalho tem como objetivo estudar o rPET como material de absorção sonora. Para que isso seja feito, será necessário dividir as atividades do trabalho em duas etapas distintas, sendo a primeira, o estudo da obtenção das características do experimento e, a segunda etapa, é a de adquirir as informações do coeficiente de absorção sonora. A base principal deste estudo surgiu do conceito de melhora e benefícios a sociedade, considerando que o material é reciclado e que talvez seja possível satisfazer o desenvolvimento do conforto acústico ao ser humano. Atualmente muitas atividades do rPET estão sendo aplicadas a outras necessidades, neste caso, uma das propostas é demonstrar a indústria e comércio que o rPET pode atender uma segunda função considerando a parte técnica e um possível aumento de receita a indústria. Em específico, nesta fase do trabalho, será apresentado somente a tapa um, que é a obtenção das características do experimento baseado na norma ISO10534-1:1996.

Palavras-chave – Acústica, rPET, coeficiente de sonido, economía circular, sostenibilidad.

1. INTRODUÇÃO

A ciência dos polímeros teve seu início a mais de 3.000 anos com os Olmecas, uma civilização mesoamericana no México que utilizava uma bola feita de borracha natural para jogar o pok-ta-pok, algum tempo depois, em 1840 ocorreu a primeira patente da vulcanização da borracha utilizando enxofre por Charles Goodyear. Após a descoberta, a borracha foi adotada em multiaplicações, e o primeiro polímero sintético (1907), não derivado de combustíveis fósseis, sem o acréscimo de elementos de plantas e animais, foi o fenol formaldeído, resistente ao calor, denominado bakelite®. Hermann Staudinger em 1920, propôs que os polímeros são considerados moléculas de massa molar, compostas por um grande número de pequenos blocos de construção, chamadas de macromoléculas, que, se tornou o princípio da ciência dos polímeros (VOET *et al.*, 2021).

O processamento de reciclagem química fechada chamado Eco Circle™, desenvolvido no Japão em 2002, é um processo que utiliza as garrafas plástica descartáveis refinando o poliéster em matéria prima reciclada e equivalente ao de um material novo a base de petróleo. Portanto é um processo de reciclagem do polietileno tereftalato conhecido como rPET, recycled polyethylene terephthalate (rPET), (Weetman, 2019).

Este trabalho tem como objetivo estudar o material de rPET como um material absorvedor sonoro, obtendo o coeficiente de absorção sonoro de um experimento baseado na norma ISO10534-1:1996. O trabalho é desenvolvido em duas etapas distintas, sendo a primeira etapa a caracterização do experimento e, a segunda etapa, a obtenção da absorção sonora do material rPET. A motivação do trabalho é justificada pela facilidade do processamento de reciclagem que o rPET possui e, dado esta condição, desenvolver uma proposta secundária de aplicação industrial é de grande valia a comunidade social e industrial. Neste processo secundário, uma grande parte é destinada ao conforto acústico e como resultado uma proposta alternativa para o aumento da receita.

A norma ISO10534-1:1996 utiliza o princípio de estudar o coeficiente de absorção sonoro utilizando uma sonda com um microfone e utiliza métodos matemáticos para o equacionamento no cálculo do coeficiente considerando as pressões sonoras de diferentes frequências introduzidas na fonte sonora. A caracterização do sistema dinâmico do tubo de impedância e seus respectivos resultados positivos, podem ser demonstrados no trabalho de Outa e Chavarette (2015).

Em outro trabalho, o rPET foi utilizado como aerogel como isolamento térmico e acústico, tendo como resultado um bom rendimento no isolamento térmico. Já no acústico, o resultado demonstrado supera o absorvedor de espuma acústica comercial em diferentes frequências (Koh *et al.*, 2018). Outro pesquisador utiliza o rPET como reforço de um material de fibra natural para obter informações acústicas, cujo resultado demonstrou que o compósito possui diversas opções atuantes nas propriedades acústicas e que não alteram o comportamento físico do material desenvolvido (Prantin Das *et al.*, 2021).

2. ECONOMIA CIRCULAR E A SUA IMPORTÂNCIA NA RECICLAGEM DA GARRAFA PET

Atualmente no consumo diário do ser humano existem diversas embalagens que são descartadas no lixo doméstico e muitos destes materiais descartados podem ser reutilizados. Estes materiais quando processados geram resultados que podem ser aplicados a algum tipo de utilização de base humana ou outro, conceitualmente, este princípio é o da economia linear que tende a extrair, produzir, e descartar, resultando na sobrecarga ecológica (Weetman, 2019).

Analisando o consumo em diversos ambientes, observa-se que o plástico é um destes materiais, que nos auxilia a manter seguro e saudável o alimento, até mesmo, melhorando a vida útil do Os plásticos que podem ser processados por fusão representavam em sua escala de volume de produção mundial 85% em 2015, considerado a maior quantidade, que são distribuídos da seguinte forma: polietileno (PE, 32%), polipropileno (PP, 23%), cloreto de polivinila (PVC, 16%), poliestireno (PS, 7%) e tereftalato de polietileno (PET, 7%) (Voet *et al.*, 2021).

O polietileno tereftalato é um plástico reciclável considerado de alta qualidade, recycled polyethylene terephthalate (rPET), que pode atender os requisitos da união Européia, European Union (EU), do Food and Drug Administration (FDA), para produzir produtos de contato com alimentos. O processo de separação do polyethylene terephthalate (PET) é feito por detectores de espectroscopia de infravermelho, near-infrared spectroscopy (NIR), após, são processados gerando flocos de aproximadamente 25,0 mm de diâmetro, sendo lavados a quente por um líquido alcalino, removendo a sujeira da superfície e outros elementos. A descontaminação dos flocos de pet é feita por um conjunto adicional de elementos químicos, resultando em flocos lavados de alta qualidade que são conhecidos como, high-quality washed flake (HQWF) (Forest, 2016).

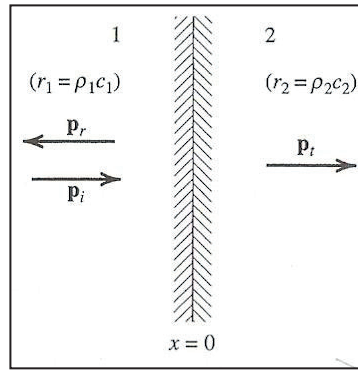
O rPET quando misturado a outras fibras pode ser utilizado como enchimento para roupas isolantes, moveis, travesseiros, em pneus de automóveis, reforço em mangueiras de incêndio e jardim, cintos de segurança e até mesmo em roupas médicas descartáveis. A propriedade molecular do PET permite que o material seja moldado por métodos comuns e empregados a outros termoplásticos. Basicamente, as garrafas PET são os recipientes preferidos destas aplicações, condicionados a sua não toxicidade, resistência, peso leve, e aparência. Conforme a combinação, um polímero de alto desempenho com a propriedade mecânica de tenacidade, resistência química e calor pode ser aplicado no ramo automotivo como em para-choques de carros e painéis traseiros dos veículos (Visakh e Liang, 2015).

Observando o conceito da aplicação do rPET é possível então introduzir o conceito da economia circular, que trabalha desacoplando o crescimento das empresas do consumo de recursos, resultando na condição de que, quando consumimos os recursos, os resíduos são eliminados no design do produto e não no descarte deste (Weetman, 2019).

3. A ENGENHARIA ACÚSTICA APLICADA A PAINÉIS DE ABSORÇÃO SONORA

Os materiais de absorção sonora podem ser classificados como fibrosos, porosos e compósitos, por ressonadores de cavidade, por fim as membranas. Os materiais porosos absorvem a energia acústica incidente e esta se dissipa por reflexões múltiplas e pelo atrito viscoso, resultando na energia térmica. Os materiais fibrosos absorvem a energia acústica incidente pelos interstícios da fibra, dissipando-se de forma vibracional. Os ressonadores de cavidades possuem paredes rígidas e aberturas estreitas, cujas cavidades auxiliam na redução do ruído até a eliminação da energia acústica. A membrana é formada por placas sobrepostas uma as outras, cujas camadas absorvem as ondas sonoras através da vibração pela flexão das membranas. Basicamente, são estruturas planas sobrepostas, de diferentes formatos que dependem do tipo de projeto para atuar com a absorção sonora, exemplificando, pode ser a placa de gesso, madeira compensada, entre outras (Kinsler *et al.*, 1999).

O comportamento de absorção sonora deve ser associado ao conceito de reflexão e transmissão da energia acústica em dois meios, o qual estabelece que a onda de pressão sonora incidente P_i , ao incidir em um meio, na região de contorno, uma quantidade desta energia tende a reincidir e refletir P_r e, uma outra parte desta energia é transmitida ao outro meio P_t . Portanto, no meio I, a onda incidente e refletida tem característica de impedância acústica $r_1 = \rho_1 c_1$ e, no meio II, a onda acústica tem característica de impedância acústica $r_2 = \rho_2 c_2$, o qual ρ é a densidade do meio e c é a velocidade de propagação do som no meio (Kinsler *et al.*, 1999; Gerges, 2000). A Fig. 1 mostra o conceito de reflexão e transmissão em dois meios, dada uma determinada região de contorno.



Fonte: Kinsler *et al.* (1999, p.151).

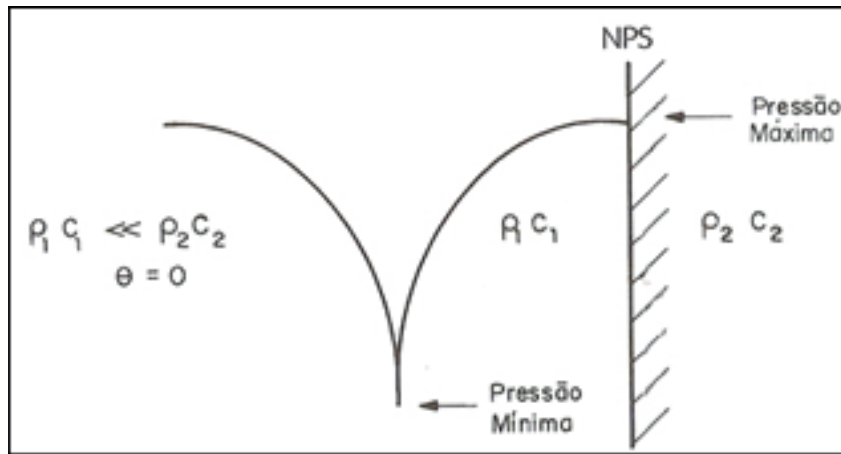
Fig. 1. Princípio de Reflexão e Transmissão em Dois Meios.

Considerando que, a onda acústica plana progressiva se propaga na direção positiva de $x = 0$ (referência), esta é representada através da equação $P_i = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)}$. A onda de pressão refletida $P_r = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}$ e, a onda de pressão transmitida $P_t = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)}$. As ondas de pressão transmitida e refletida tem a mesma frequência da onda incidente, mas o número de onda é diferente, referenciada pela velocidade no meio I e II. Com isso, o número de ondas no meio I é $k_1 = \frac{\omega}{c_1}$, e o número de ondas no meio II é $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ e

o coeficiente de reflexão $C_r = \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \right)^2 = \left(\frac{\frac{r_2}{r_1} - 1}{\frac{r_2}{r_1} + 1} \right)^2$ e, o coeficiente de transmissão é $C_t = \frac{4r_2 r_1}{(r_2 + r_1)^2} = \frac{4\frac{r_2}{r_1}}{\left(\frac{r_2}{r_1} + 1 \right)^2}$

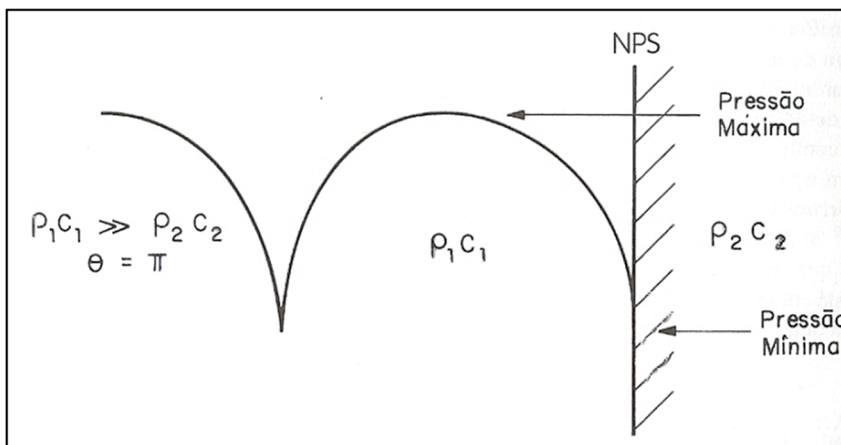
(Kinsler *et al.*, 1999; Gerges, 2000).

A pressão acústica é máxima quando a razão da impedância do meio I e meio II tenderem a zero ($\frac{r_1}{r_2} \rightarrow 0$), portanto, a impedância do meio II é maior que a do meio I ($r_2 > r_1$). A pressão acústica é mínima quando a razão do meio I e meio II tenderem a infinito ($\frac{r_1}{r_2} \rightarrow \infty$), portanto, a impedância do meio I é muito maior que a do meio II ($r_1 \gg r_2$) (Kinsler *et al.*, 1999; Gerges, 2000). A Fig. 2 e 3 mostram a relação da pressão máxima e mínima.



Fonte: Gerges (2000, p. 193).

Fig. 2. Onda Estacionária de pressão máxima.



Fonte: Gerges (2000, p. 194).

Fig. 3. Onda estacionaria de pressão mínima.

A onda de pressão estacionária é considerada a superposição da onda incidente e refletida, ou seja, é a soma da amplitude da onda incidente e refletida, formando uma só onda de mesma frequência. Com isso, é possível medir o coeficiente de absorção sonoro através da equação

$$\alpha = \frac{4 \cdot ROE}{(ROE + 1)^2} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \quad (2)$$

note que, ROE forma a razão das ondas estacionárias, onde A é a amplitude da pressão máxima e B é a amplitude da pressão mínima. A razão da onda estacionária é escrita como, $ROE = \frac{A+B}{A-B}$ (Kinsler *et al.*, 1999; Gerges, 2000).

A Tabela 1 mostra os diferentes tipos de materiais e seus coeficientes de absorção respectivamente para as diferentes frequências.

Tabela 1. Materiais de Absorção Acústica Geral.

Tabela de Coeficiente de Absorção Sonora para variados materiais e para materiais comum NRC							
Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC Hz
fibra de vidro (84 kg/m ³) 25mm	0,07	0,23	0,48	0,83	0,88	0,8	0,61
fibra de vidro (84 kg/m ³) 50mm	0,2	0,55	0,89	0,97	0,83	0,79	0,81
fibra de vidro (84 kg/m ³) 100mm	0,39	0,91	0,99	0,97	0,94	0,89	0,95
espuma de poliuretano (celula aberta) 8mm espessura	0,05	0,07	0,1	0,2	0,45	0,81	0,21
espuma de poliuretano (celula aberta) 12mm espessura	0,05	0,12	0,25	0,57	0,89	0,98	0,46
espuma de poliuretano (celula aberta) 25mm espessura	0,14	0,3	0,83	0,91	0,98	0,91	0,71
espuma de poliuretano (celula aberta) 50mm espessura	0,35	0,51	0,82	0,98	0,97	0,95	0,82
feltro de pelo bovino 12mm espessura	0,05	0,07	0,29	0,83	0,83	0,87	0,46
feltro de pelo bovino 25mm espessura	0,06	0,31	0,8	0,88	0,87	0,87	0,72
tijolo fosco	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
pinturas	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
bloco de concreto pintado	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,03	0,07
concreto	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
madeira	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,09
vidro	0,35	0,25	0,18	0,12	0,08	0,04	0,16
placa de gesso	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	0,07
placa de madeira 10mm	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11	0,15
bloco de concreto pintado soundblox tipo A (encaixados), 150mm	0,62	0,84	0,36	0,43	0,27	0,5	0,48
bloco de concreto pintado soundblox tipo B, 150mm	0,31	0,97	0,56	0,47	0,51	0,53	0,63
Jateamento Acústico (sobre o gesso - placa de parede)	0,15	0,47	0,88	0,92	0,87	0,88	0,79
Gesso acústico (25mm espessura)	0,25	0,45	0,78	0,92	0,89	0,87	0,76
Carpete em espuma de borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
Carpete em concreto	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,66	0,29

Fonte: Adaptado de Crocker (2007, p. 708).

A Tabela 2 mostra o coeficiente de absorção específico de mercado.

Tabela 2. Materiais de Absorção Acústica de Mercado.

TABELA 10.1 Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos/fibrosos*												
Material						Frequência central da banda de oitava (Hz)						NRC
						125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Fibroso	Isover – Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado	Densidade (kg/m³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66
			60		50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92
		Densidade (kg/m³)	32	Espessura (mm)	25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73
					60	50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96
	Thermax – RockFibras Manta de lã de rocha basáltica	Densidade (kg/m³)	64	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
					100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		Densidade (kg/m³)	32	Espessura (mm)	50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90
					100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17
Poroso	Espumex – Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível	Densidade (kg/m³)	30	Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
					60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
					70	0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64
					75	0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85
	Sonex – Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) densidade: 32 kg/m³	Densidade (kg/m³)	32	Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,89

*Valores indicativos. Utilizar sempre o coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante.

*Valores indicativos. Utilizar sempre o coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante.

Fonte: Bistafa (2011, p. 247).

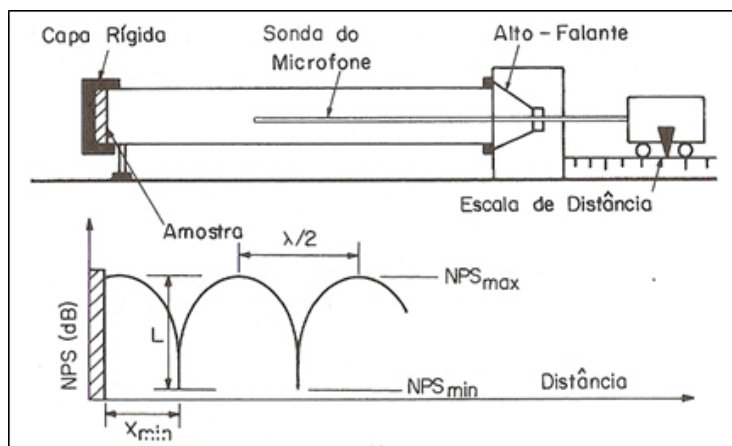
4. NORMA ISO 10534-1:1996 – TUBO DE IMPEDANCIA

O tubo de impedância é um experimento o qual se mede o coeficiente de absorção sonoro de diferentes materiais, que é desenvolvido e aplicado utilizando duas normas específicas e de diferente experimentação: a ISO10534-1:1996 e a ISO10534-2:1998 (ISO10534-1, 1996).

O tubo de impedância da norma ISO10534-1:1996 foi desenvolvido, considerando um tubo redondo de comprimento l e diâmetro d , cujas extremidades possuem de um lado referencial o acoplamento de um alto-falante e, no lado oposto, uma tampa vedação total. Através de uma sonda interna ao tubo é captada a onda de pressão sonora em diferentes posições, das quais variam conforme a frequência experimental. O funcionamento interno ao tubo, se inicia com uma onda de pressão sonora continua a uma determinada faixa de frequência, o qual, após um determinado intervalo de tempo, esta onda se torna uma onda estacionária demonstrando as diferentes pressões acústicas ao longo do tubo (ISO10534-1, 1996).

Para que se inicie as experimentações é necessário estabelecer duas condições básicas, o primeiro é o comprimento de onda $\lambda = \frac{c}{f}$, o qual c é a velocidade do som no ar $\approx 344 \frac{m}{s}$, e f é a frequência de trabalho.

A segunda condição é baseada na frequência de corte $f_c = \frac{1.84 c}{\pi d}$, o qual d é o diâmetro do tubo. Estas duas condições estabelecem o critério das frequências que irão ser trabalhadas no experimento (Crocker, 2007; Gerges, 2000; Outa e Chavarette, 2015). A Fig. 4 mostra o desenho esquemático do tubo de impedância considerando os diferentes tipos de componentes e uma proposição do comportamento da onda estacionária no interior do tubo.



Fonte: GERGES (2000, p.321).

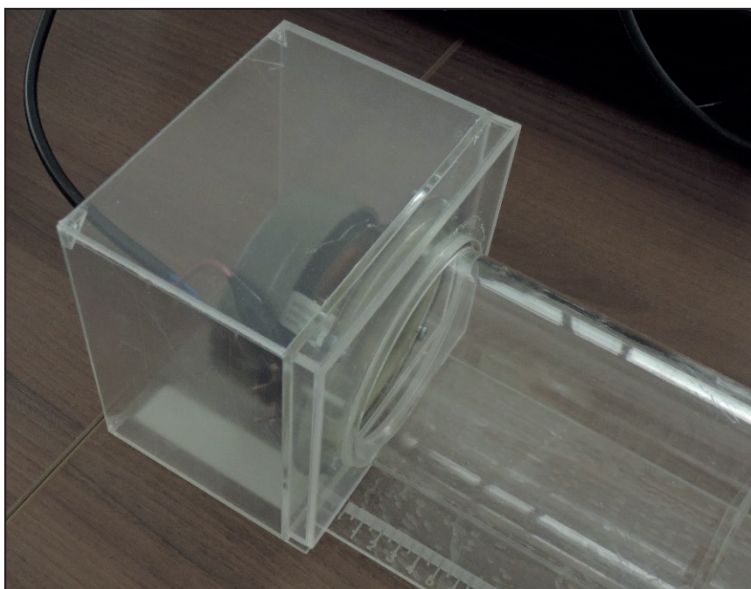
Fig. 4. Tubo de Impedância com Proposição da Onda Estacionária.

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL – CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento do tubo de impedância foi desenvolvido no laboratório de Metrologia da Fatec Lins, baseando-se na norma ISO10534-1:1996. O experimento é composto de:

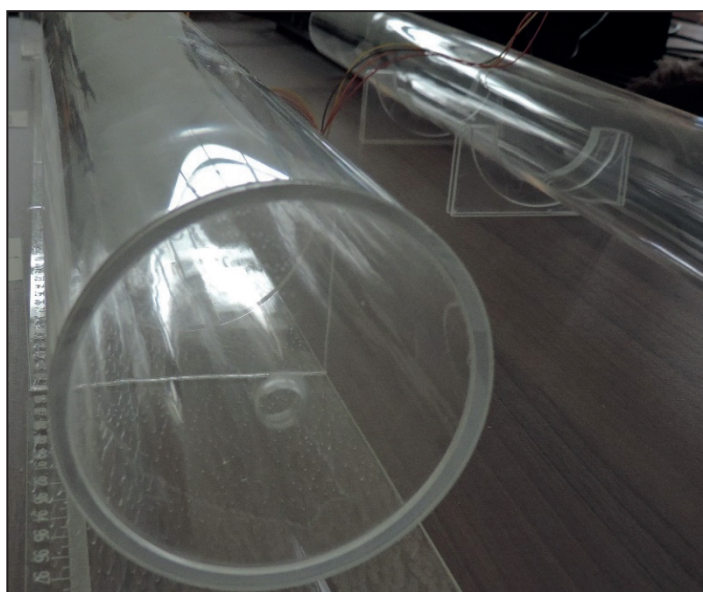
- Alto-falante Bravox PM5 – 90 W;
- Gerador de função BK Precision 4052 – 5 MHz;
- Amplificador LA4000-LEACS;
- Sensor de áudio 5 V;
- Vareta de aço inox Ø13,0 mm - captação da pressão sonora;
- Tubo de acrílico transparente 100 x 1000 mm;
- Tampa de acrílico Ø 100 mm;
- Acessórios (fios e cabos de conexão).

A construção e montagem do experimento foi feita da seguinte forma, o tubo de acrílico é posicionado sobre uma base e em uma das extremidades se encontra o alto-falante que quando acionado gerará a pressão sonora constante a uma determinada frequência. No lado oposto ao alto-falante, encontra-se a outra extremidade permeada pela tampa de acrílico com um furo central que será inserido a vareta de aço inox de $\varnothing 13,0\text{ mm}$. Nesta tampa de acrílico está acoplada uma placa de metal para que a reflexão da pressão sonora incidente, reflita a sua totalidade. Ligado ao alto-falante se encontra o amplificador e nele o gerador de função. O setup do equipamento é feito utilizando inicialmente a frequência de 500 Hz, após a leitura com a sonda de varredura no interior do tubo é então alterada a frequência para 1000 Hz, e assim será até 2000 Hz. Cada varredura no interior do tubo feita pela sonda, capta as diferentes pressões sonoras, que são armazenadas em um banco de dados. O resultado é obter um banco de dados das pressões sonoras de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. A Figura 5 e 6 mostram o experimento do tubo de impedancia detalhado.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 5. Fonte Sonora Acoplada ao Tubo de Impedancia.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 6. Extremidade Oposta a Fonte Sonora com Tampa de Vedação.

O primeiro passo é estabelecer o critério de limites experimentais, e com isso, é necessário estabelecer o critério do comprimento $l = 1000$ mm e diâmetro do tubo $d = 100$ mm que farão parte do experimento. O cálculo para este trabalho de pesquisa pode ser mostrado na Tabela 3, que contém a frequência de trabalho, o comprimento de onda e a frequência de corte.

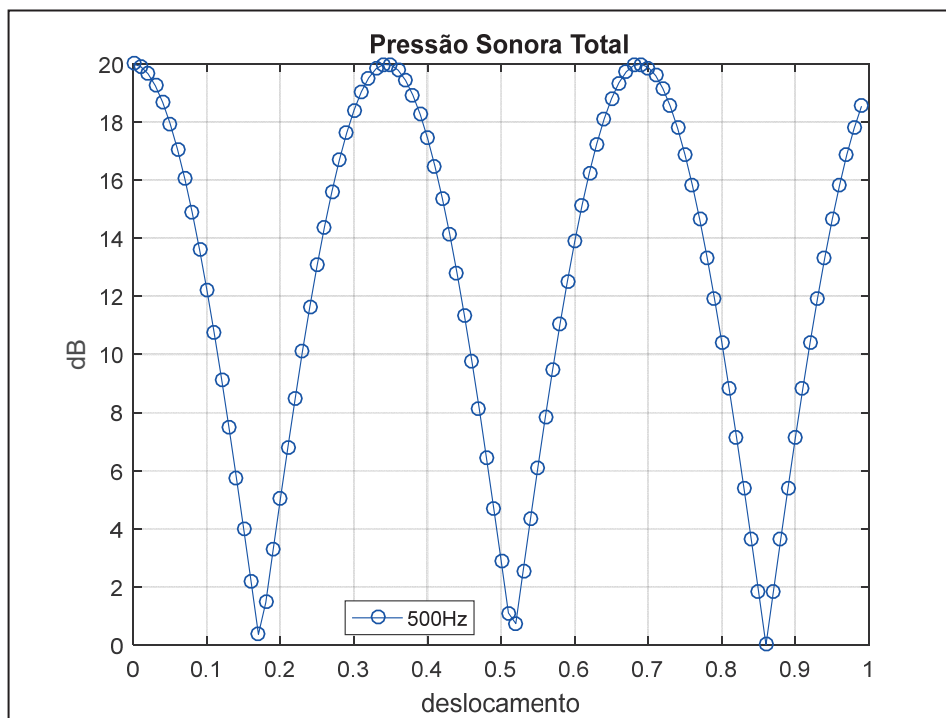
Tabela 3. Fatores de Construção do Experimento Calculado.

f	λ	f_c (Hz)
63	5,5040	2.616,5900
125	2,7520	
250	1,3760	
500	0,6880	
1.000	0,3440	
2.000	0,1720	
4.000	NA	

Fonte: Desenvolvimento Próprio.

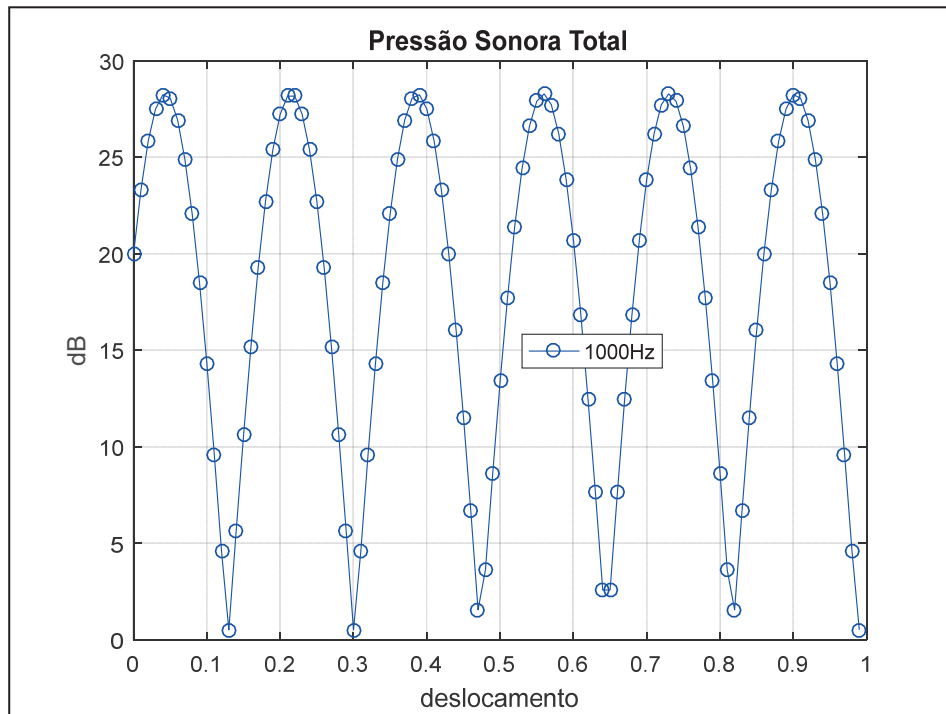
Note que na Tabela 3 são mostrados os resultados de cada frequência de trabalho relativo ao comprimento de onda e do resultado da frequência de corte. Observa-se que, dado os resultados das frequências de trabalho deste experimento que devem ser utilizadas são: 500 Hz; 1000 Hz e 2000 Hz.

O resultado da sonda, no interior do tubo estabeleceu um resultado que é possível de se analisar, propondo a fundamentação de similaridade entre o modelo teórico e o modelo experimental. O modelo teórico utiliza o conceito do princípio de reflexão e transmissão em dois meios para se obter as Figuras 7, 8 e 9, o qual correspondem respectivamente ao resultado do modelo teórico de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.



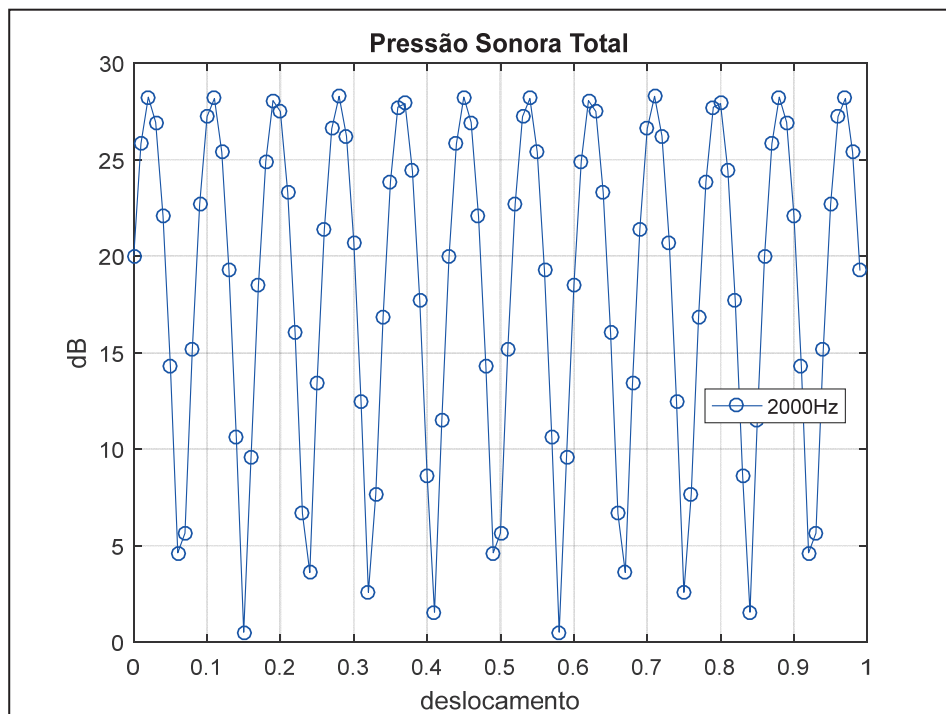
Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 7. Modelo teórico de 500Hz.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

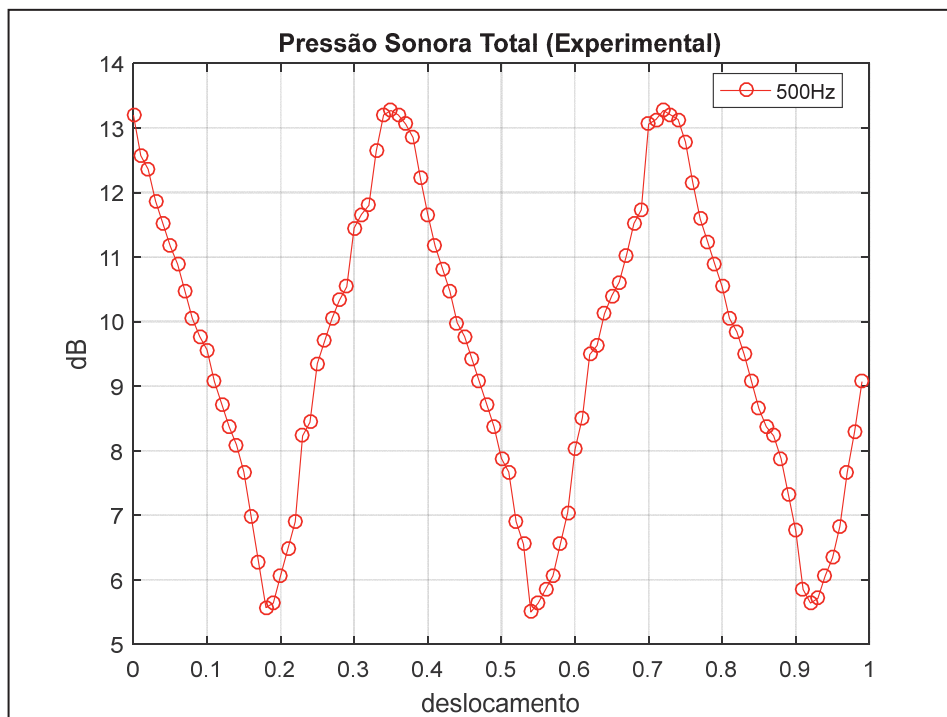
Fig. 8. Modelo teórico de 1000Hz.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

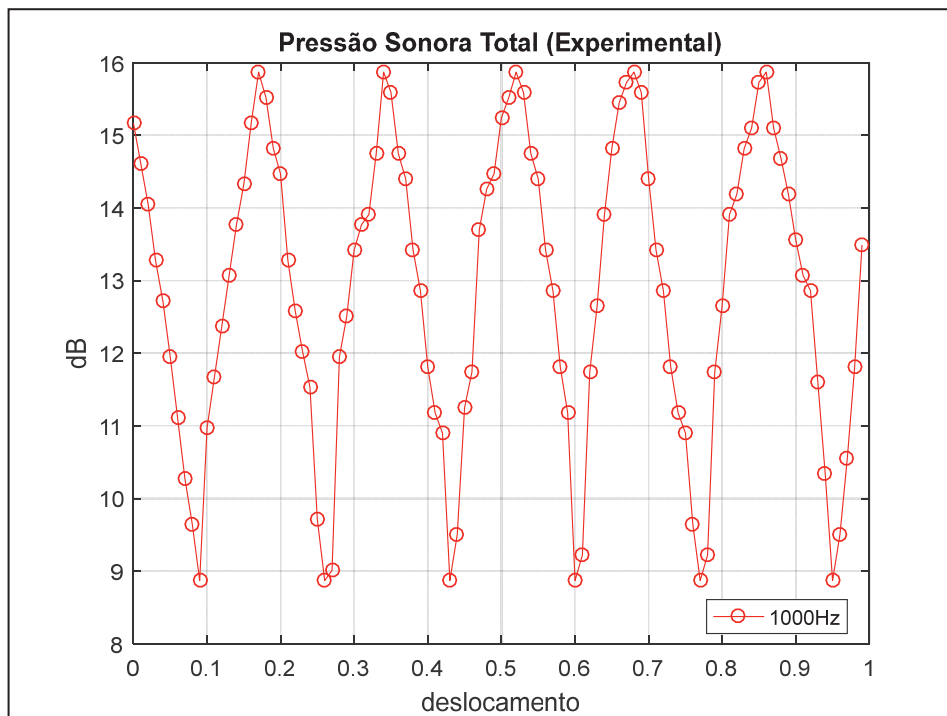
Fig. 9. Modelo teórico de 2000 Hz.

O resultado experimental da medição da pressão sonora pode ser visto nas Figuras 10, 11 e 12.



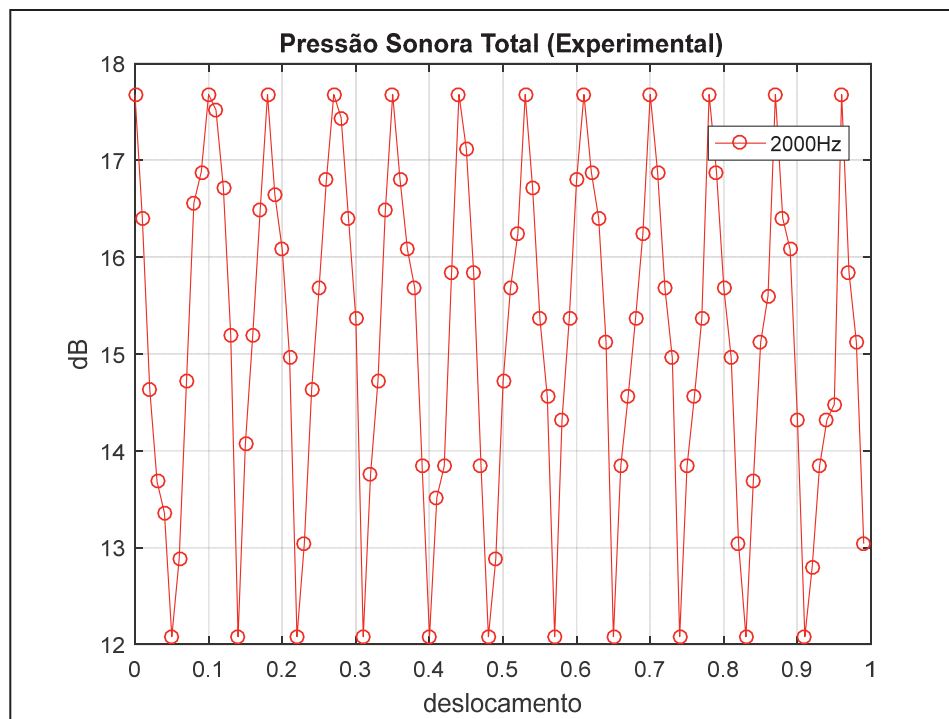
Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 10. Modelo experimental de 500 Hz.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 11. Modelo experimental de 1000 Hz.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Fig. 12. Modelo experimental de 2000 Hz.

A Tabela 4 mostra o resultado das pressões mínimas do modelo teórico e modelo experimental. O cálculo dos nodos utiliza a equação $x_{(min,n)} = ((2n-1) \lambda_0)/4$ (para $n=1,2,\dots,n$) (ISO10534-1:1996, 1996).

Tabela 4. Resultado das Pressões Mínimas do Modelo Teórico e Experimental.

Ubicación de la presión mínima del modelo teórico y experimental					
500Hz		1000Hz		2000Hz	
Modelo Teórico	Modelo Experimental	Modelo Teórico	Modelo Experimental	Modelo Teórico	Modelo Experimental
17	18	13	9	6	5
52	54	3	26	15	14
86	92	47	46	24	22
		65	60	32	31
		82	77	41	4
		99	95	49	48
				58	57
				67	65
				75	74
				84	83
				92	91
				99	99

Fonte: Desenvolvimento Próprio.

Note que na Tabela 4 as diferenças de localização são existentes e podem ser explicadas considerando a limitação do experimento. Neste experimento foram coletadas 100 amostras de pressão acústica internamente ao tubo, pela sonda com microfone, e utilizando o teorema do cálculo amostral finito, seriam necessárias 94 amostras que garantiriam 95% do nível de confiança com erro amostral de 2%. Portanto, é possível afirmar que o tamanho da amostra é válido para o resultado obtido. A Tabela 5 mostra o resultado da média e variância do resultado das pressões sonoras experimental para 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Tabela 5. Valores de Média e Variância das Pressões Sonoras.

Cálculo de la media y variación de la experimental		
Frecuencia	medio	variación
500Hz	1207	33,46
1000Hz	1198	30,09
2000Hz	1189	21,75

Fonte: Desenvolvimento Próprio

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A norma ISO10534-1:1996 demonstra como deve ser construído o experimento do tubo de impedância com seus fatores limitantes, o qual, neste trabalho seguiu-se a orientação da construção e da metodologia estabelecidas para o comprimento de onda e frequência de corte. Nesta fase as características que devem ser analisadas é a localização dos pontos nodais do modelo teórico e do modelo experimental. A referência está no modelo teórico, considerado um possível modelo sem perdas. Através das referências das diferentes pressões sonoras, os pontos nodais do modelo experimental podem ser avaliados, dada a referência do modelo teórico. Resultando no comportamento das ondas de pressão sonora mínima no interior do tubo do experimento. O resultado da diferença entre o modelo teórico e experimental é considerado pelo erro experimental sistemático ligado a calibração do sistema dinâmico. A adoção do erro sistemático experimental foi necessária, pois todo o modelo real tem perdas e são acessíveis atuação das forças externas ao sistema. Com isso, as amplitudes da pressão sonora entre os dois modelos também possuem diferenças.

O tamanho da amostra é avaliado pelo teorema de amostral finito, cuja condição, permite que para 100 amostras coletadas, 94 seriam satisfatórias. Resultando na análise de que o erro amostral é de 2% com nível de confiança de 95%. Permitindo assim a aceitação do tamanho amostral.

Outro fator importante é o cálculo da média e variância dos diferentes sinais de pressão sonora, oriundas das frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. As médias e variâncias, podem ser mais bem analisadas quando ocorrerem a coleta das pressões sonoras com o material rPET no tubo. Acarretando um possível padrão para serem utilizados em outros procedimentos de amostras de medição de absorção acústica.

7. CONCLUSÃO

A conclusão desta primeira etapa demonstra que as características do tubo foram captadas, entendidas e relatadas. Tornando assim possível de entender o comportamento da pressão sonora no interior do tubo e pela relevância do erro sistemático experimental.

Através deste fato é possível de afirmar que o objetivo primeiro foi atendido com sucesso.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Bistafa, S.R., *Acústica aplicada ao controle de ruído*. São Paulo: Edgard Blucher (2011)

- [2] Crocker, M.J., *Handbook of noise and vibration control*. Hoboken: John Wiley & Sons (2007)
- [3] Forrest, M., *Recycling of Polyethylene Terephthalate*, Smithers Information Ltd, Shropshire (2016)
- [4] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., *Fundamentals of Acoustics*. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons (1999)
- [5] Koh, H.W., Le, D.K., Ng, G.N., Zhang, X., Phan-Thien, N., Kureemun, U., Duong, H.M., “Advanced Recycled Polyethylene Terephthalate Aerogels from Plastic Waste for Acoustic and Thermal Insulation Applications”, *Gels*, **2**(4), 1-13 (2018) doi: <https://doi.org/10.3390/gels4020043>
- [6] Outa, R., Chavarette, F.R., “Caracterização do Experimento do Tubo de Impedância de Um Microfone”, *Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo*, **3**(BT39), 16-19 (2015)
- [7] Pratim Das, P., Chaudhary, V., Ahmad, F., Manral, A., Gupta, S., Gupta, P., “Acoustic performance of natural fiber reinforced polymer composites: Influencing factors, future scope, challenges, and applications”, *Polymer Composites*, **43**(3) (2021) <https://doi.org/10.1002/pc.26455>
- [8] Visakh, P.M., Liang, M., *Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites And Nanocomposites*, Elsevier, Oxford (2015)
- [9] Voet, V., Jager, J., Folkersma, R., *Plastics in the Circular Economy*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin (2021)
- [10] Weetman, C., *Economia Circular: Conceitos e Estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa*, Autentica Business, São Paulo (2019)

ANALYSIS OF QUALITY CHARACTERISTICS IN A SOUND PRESSURE PIPE: ISO10534-1:1996 APPLICATIONS

Abstract – This work aims to study rPET as a sound absorption material. For this to be done, it will be necessary to divide the work activities into two distinct stages, the first being the study of obtaining the characteristics of the experiment and, the second stage, is to acquire the information of the sound absorption coefficient. The main basis of this study arose from the concept of improvement and benefits to society, considering that the material is recycled and that it may be possible to satisfy the development of acoustic comfort to the human being. Currently many rPET activities are being applied to other needs, in this case, one of the proposals is to demonstrate to industry and trade that rPET can meet a second function considering the technical part and a possible increase in revenue to the industry. In specific, in this phase of the work, only the slap one will be presented, which is the obtaining of the characteristics of the experiment based on the iso10534-1:1996 standard.

Keywords – Acoustics; rPET, Sound Coefficient, Circular Economy, Sustainability.

