



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Correspondência entre sinais impulsivos de reflexão e incidência sonora sobre superfícies difusoras

Pazos, D. F. P.¹; Musafir, R. E.²

¹ Laboratório de Ensaios Acústicos, INMETRO, Duque de Caxias, RJ, Brasil, dfpazos@inmetro.gov.br

² Programa de Engenharia Mecânica, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, rem@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo

Devido ao espalhamento sonoro promovido por superfícies difusoras, o respectivo coeficiente de reflexão, determinado pela razão entre os espectros de pressão sonora refletida e incidente, apresenta em altas frequências valores discrepantes maiores que a unidade. Portanto, para uma adequada avaliação da reflexão de tais superfícies, propõe-se quantificar a correspondência (i.e. a semelhança) entre os sinais refletido e incidente. Considerando a resposta a um impulso de incidência normal sobre uma região de superfície difusora, os pulsos de reflexão são compostos pela parte especular, proveniente dos pulsos incidentes nessa região, e pela espalhada, devido à incidência adjacente. Sincroniza-se adequadamente os pulsos de um sinal incidente, obtido sem superfície, aos especulares do sinal de reflexão e ambos os sinais são então multiplicados entre si, resultando num sinal de correspondência entre eles. Essa medida é normalizada pelo quadrado dos pulsos incidentes sincronizados, consistindo num sinal padrão de correspondência. A razão entre as amplitudes espectrais desses sinais resultantes fornece um fator de correspondência entre a pressão sonora refletida especular e a incidente. São feitas análises a partir de medições de incidência normal sobre amostras de superfícies difusoras corrugadas, incluindo locais de incidência distintos sobre as corrugações, além de uma superfície lisa. É mostrado que para superfícies difusoras, diferentemente do coeficiente de reflexão, o fator proposto fornece valores plausíveis ao longo de todo o espectro. Tais resultados sugerem a possibilidade de aplicação deste parâmetro para a avaliação da reflexão e da difusão sonora de tais superfícies.

Palavras-chave: reflexão sonora, espalhamento sonoro, superfícies difusoras.

PACS: 43.20.El, 43.20.Fn, 43.30.Hw, 43.60.-c.

Abstract

Due to the sound scattering promoted by diffuser surfaces, the associated reflection coefficient, determined by the ratio between reflected and incident sound pressure spectra, shows unreasonable values greater than unity at high frequencies. Therefore, for an adequate assessment of the reflection of such surfaces, it is proposed to quantify the correspondence (i.e. the similarity) between the reflected and incident signals. Considering the impulse response at normal incidence over a region of a diffuser surface, the reflected pulses are composed by the specular part, from the incident pulses on this region, and by the scattered one, due to the adjacent incidence. By adequately synchronizing the pulses of an incident signal, acquired without surface, to the specular ones of a reflected signal and multiplying them by each other, a correspondence signal between them is created. This measure is normalized by the square of the synchronized incident pulses, consisting in a standard corresponding signal. The ratio between the amplitudes of the resulting signals spectra provides a correspondence factor between the specular reflected and the incident sound pressure. Analyses are done from measurements of normal incidence on samples of corrugated diffuser surfaces, including other incidence regions over the corrugations, besides a flat surface. It is shown that for diffuser surfaces, unlike the reflection coefficient, the proposed factor supplies good values along all over the spectrum. Such results indicate the possibility of applying this parameter for the evaluation of sound reflection and diffusion of such surfaces.

Keywords: sound reflection, sound scattering, diffuser surfaces.



1. INTRODUÇÃO

Superfícies difusoras são empregadas em diversas situações acústicas, tanto em ambientes abertos ou fechados, com o intuito de promover espalhamento do som que incide sobre elas. O espalhamento diminui em certo grau a reflexão especular ao permitir que o som seja refletido em outras direções. O fenômeno é mais notável em altas frequências, para as quais os comprimentos de onda são comparáveis às dimensões das irregularidades superficiais. Estas podem ser corrugações, ou seja, rebaixos e rebaiços, ou descontinuidades de impedância acústica ao longo da superfície. Caracterizar a reflexão e o espalhamento sonoro promovido por esse tipo de superfícies é, pois, importante para otimizar projetos acústicos que as empreguem.

Para avaliar a reflexão sonora de superfícies quaisquer, comumente utiliza-se o coeficiente de reflexão (R), a razão entre as amplitudes espectrais de pressão sonora refletida e incidente. Em princípio, o módulo de R não deve passar de 1, já que fisicamente a energia refletida não pode ser maior que a incidente. O parâmetro pode ser obtido experimentalmente em laboratório ou in-situ, por métodos normalizados ou não [1]. Outros parâmetros relacionados são a absorção sonora, a impedância de superfície, além da função de transferência entre medições com e sem superfície e do fator de reflexão (também conhecido por refletância), a razão entre as energias refletida e incidente. Diversos trabalhos continuam sendo elaborados no intuito de avaliar experimentalmente a reflexão sonora de superfícies difusoras, uma vez que o espalhamento é um fenômeno relativamente complexo, cuja caracterização não é tão simples [2].

Recentemente, investigações sobre a reflexão sonora de superfícies difusoras corrugadas foram conduzidas com o método de dois microfones [3]. Foram medidas respostas ao impulso (resp. impulsivas) em duas posições junto a amostras de superfícies corrugadas periódicas sob incidência normal. Cada sinal medido apresenta pulsos incidentes seguidos por pulsos refletidos, ocorrendo em instantes

distintos, que dependem das posições de medição. Os pulsos incidentes e os refletidos especulares de um sinal medido numa posição são alternadamente sobrepostos a seus pares do sinal obtido na outra posição e ajustados na amplitude para serem subtraídos e eliminados entre si. Obtém-se, assim, dois sinais com pulsos invertidos, um idealmente composto só por pulsos incidentes e outro apenas pelos refletidos. Ambos os sinais são adequadamente sincronizados e ajustados na amplitude, para se obter o coeficiente de reflexão das superfícies. No entanto, por conter elementos além do especular, em superfícies difusoras a energia do sinal refletido medido tende a ser maior do que a do sinal incidente, ocorrendo em altas frequências coeficiente de reflexão maior do que a unidade, como mostrado em [3].

Utilizando respostas impulsivas para se obter o coeficiente de reflexão sonora de superfícies difusoras, idealmente poder-se-ia selecionar pulsos refletidos isolados e compará-los com os respectivos pulsos incidentes que os originaram. Isso foi investigado em [3], aplicando um janelamento temporal muito curto para separar os pulsos especulares do restante do sinal refletido. Contudo, para perfis de corrugações cujos pulsos refletidos apresentam-se muito juntos entre si, não é possível, através dessa técnica, eliminar satisfatoriamente os pulsos de espalhamento, pois há um compromisso entre o tamanho da janela e a qualidade dos resultados. Um janelamento muito curto e abrupto leva a valores de coeficiente de reflexão com pouca resolução principalmente em baixas frequências, além de se introduzir componentes espectrais espúrias. Por outro lado, com uma janela mais larga e suave não se consegue atenuar adequadamente os pulsos de espalhamento, não resolvendo, portanto, o problema do coeficiente de reflexão em altas frequências, que se apresenta com muitas oscilações, devido à interferência entre os pulsos refletidos (efeito filtro pente) [3].

Desta forma, embora não haja problemas para superfícies lisas, o coeficiente de reflexão e outros parâmetros diretamente relacionados têm limitações para a caracterização da reflexão de superfícies difusoras. Tal como

proposto em [4, 5], para uma avaliação mais adequada, é necessário medir em diversas posições sobre a superfície (método de multi-microfones), determinando coeficientes de reflexão distintos, referentes às diversas ordens de reflexão, além da ordem zero, ou seja, da especular. Entretanto, é um método um tanto complexo e que pode requerer muitos pontos de medição sobre as superfícies.

Diante dessas limitações na avaliação de superfícies difusoras através do coeficiente de reflexão, pode-se elaborar outra abordagem para tal. Este trabalho propõe-se, pois, a quantificar a correspondência entre os pulsos de reflexão e de incidência sobre tais superfície. Uma forma de identificar a correspondência entre pulsos sobrepostos é pelo produto entre eles. Após sincronização de pulsos e correção de amplitude, efetua-se a multiplicação entre o sinal refletido e o incidente, além do incidente consigo mesmo, obtidos por respostas impulsivas sob incidência normal com e sem superfícies difusoras. A multiplicação entre sinais impulsivos sincronizados resulta numa combinação dos respectivos pulsos, eliminando os demais não correspondentes. A razão entre as amplitudes dos sinais resultantes das multiplicações é um parâmetro que permite quantificar a correspondência espectral entre sinal refletido e incidente. Pode-se assim avaliar não só a reflexão especular, proveniente da região de incidência normal, mas também a reflexão espalhada de outras regiões adjacentes, sendo apenas necessário obter os respectivos pulsos incidentes. São realizadas análises do parâmetro determinado experimentalmente com superfícies corrugadas periódicas de perfil quadrado e triangular, além de um perfil liso, tal como em [3], podendo ser útil para avaliar o espalhamento e a reflexão de tais superfícies.

2. CORRESPONDÊNCIA ENTRE SINAIS

A correspondência (também chamada de semelhança) entre sinais é uma característica que indica o quanto um sinal é matematicamente relacionado a outro, sendo a correlação cruzada e o produto entre sinais formas de caracterizá-la. Considerando dois sinais no tempo t , $s_a(t)$ e $s_b(t)$, deseja-se

relacionar linearmente, num determinado intervalo temporal, o *sinal relacionado*, $s_b(t)$, com o *sinal padrão*, $s_a(t)$, através de um único *fator de correspondência* (ou correspondente) $F_{b,a}$ entre eles, ou seja, $s_b(t) \approx F_{b,a} s_a(t)$. O erro ϵ nessa aproximação num instante t qualquer é $\epsilon(t) = s_b(t) - F_{b,a} s_a(t)$. O valor ótimo de $F_{b,a}$, para tal aproximação entre dois instantes t_1 e t_2 , pode ser estimado pelo que minimiza o erro quadrático médio nesse intervalo [6], ou seja,

$$\overline{\epsilon_{b,a}^2}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [s_b^2(t) - 2F_{b,a} s_a(t)s_b(t) + F_{b,a}^2 s_a^2(t)] dt}{t_2 - t_1} \quad (1),$$

podendo ser obtido da condição de derivada nula de $\overline{\epsilon_{b,a}^2}$ em relação a $F_{b,a}$, isto é,

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\partial s_b^2(t)}{\partial F_{b,a}} - \frac{\partial [2F_{b,a} s_a(t)s_b(t)]}{\partial F_{b,a}} + \frac{\partial [F_{b,a}^2 s_a^2(t)]}{\partial F_{b,a}} \right] dt = 0 \quad (2).$$

Como $s_a(t)$ e $s_b(t)$ não dependem de $F_{b,a}$, suas derivadas são nulas e chega-se à expressão [7]

$$F_{b,a} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} s_a(t)s_b(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} s_a^2(t) dt} \quad (3).$$

Então, num dado intervalo de tempo, o fator correspondente ótimo $F_{b,a}$ entre o sinal relacionado e o padrão pode ser expresso pela razão entre o produto escalar (ou a correlação cruzada sem atraso temporal) entre esses sinais e a energia do sinal padrão (ou a autocorrelação sem atraso). Se o intervalo de tempo for infinitesimal, conclui-se que, para um instante t qualquer, o fator de correspondência instantâneo ($F_{b,a,t}$) pode ser dado pela razão entre os integrandos da expressão acima. Embora a simples divisão entre o sinal relacionado e o padrão também resulte na relação instantânea entre eles, o produto dos sinais indica a intensidade de sobreposição ao longo do tempo. Tem-se então um *sinal de correspondência*, que, através da divisão, é comparado ao quadrado do sinal padrão, um padrão de distribuição temporal de energia. Se $|s_a(t)| \leq |s_b(t)|$, obtém-se $|F_{b,a,t}| \leq 1$.

2.1. Fator de correspondência na frequência

Analogamente no domínio da frequência, a razão entre a amplitude espectral do produto entre os sinais e a do quadrado do sinal padrão fornece o *fator de correspondência para uma*



dada frequência f ($F_{b,a}(f)$). Assim, aplicando o teorema da convolução, tem-se que a transformada de Fourier (FT) do produto entre dois sinais no domínio do tempo resulta numa operação de convolução (*) entre os espectros de cada sinal [6]. A convolução gera um *espectro de correspondência* ($C_{a*b}(f)$), indicando a semelhança entre os sinais na frequência. Já a autoconvolução do espectro padrão ($C_{a*a}(f)$) refere-se ao padrão de semelhança espectral e normaliza o espectro de correspondência entre os sinais, através da divisão. Então, sendo $S_a(f)$ e $S_b(f)$ os espectros de $s_a(t)$ e $s_b(t)$ respectivamente, tem-se, portanto, a expressão

$$F_{b,a}(f) = \frac{\text{FT}[s_a(t)s_b(t)]}{\text{FT}[s_a^2(t)]} = \frac{S_a(f)*S_b(f)}{S_a(f)*S_a(f)} =$$

$$F_{b,a}(f) = \frac{C_{a*b}(f)}{C_{a*a}(f)} \quad (4).$$

2.2. Fator de correspondência entre sinais impulsivos de reflexão e incidência sonora

Seja uma frente de onda de um impulso sonoro, atingindo uma superfície refletora extensa, junto a qual se mede a pressão sonora num ponto sobre uma dada região da superfície submetida à incidência normal (Fig. 1 acima à esquerda). O sinal temporal medido $p(t)$ consiste inicialmente de uma parte direta ou incidente $p_{i,0}(t)$ no instante $t_{i,0}$, sendo referente ao pulso que atinge a superfície na referida região, e de uma parte refletida $p_r(t)$. Esta é composta pelo pulso refletido especular ou de ordem 0, ocorrendo no instante t_0 subsequente e, no caso de superfícies difusoras não divergentes, seguido por diversos pulsos espalhados, cada qual num dado instante t_n , ($n = 1, 2, \dots, N$, é a ordem da reflexão) (Fig. 1 acima à direita). O pulso refletido especular é proveniente do incidente, que atinge a superfície e retorna ao ponto de medição, possuindo, em princípio no caso de uma superfície lisa e refletora, grande correspondência ou semelhança com ele. Já os demais pulsos espalhados de superfícies difusoras são devidos a pulsos incidentes da frente de onda, que atingem regiões adjacentes à região de incidência normal, refletidos de forma difusa, chegando assim posteriormente (Fig. 1). Então, exprimindo os pulsos como

funções triangulares $\Lambda(t)$, ocorrendo em t_n com largura temporal δt_n bem estreita ($\delta t_n \ll t_n$) e amplitude A_n , tem-se que a parte incidente e a refletida do sinal medido, $p(t) = p_{i,0}(t) + p_r(t)$, podem ser representadas respectivamente por

$$p_{i,0}(t) = A_{i,0}\Lambda((t - t_{i,0})/\delta t_{i,0}) \quad (5),$$

$$p_r(t) = A_0\Lambda\left(\frac{t-t_0}{\delta t_0}\right) + A_1\Lambda\left(\frac{t-t_1}{\delta t_1}\right) + \dots =$$

$$p_r(t) = \sum_{n=0}^N A_n\Lambda\left(\frac{t-t_n}{\delta t_n}\right) \quad (6).$$

Para contornar as dificuldades na avaliação da reflexão sonora de superfícies difusoras através do coeficiente de reflexão, o estudo da correspondência entre sinais [7] pode ser uma abordagem a se considerar. Para sinais impulsivos, a correlação cruzada entre o sinal incidente e a refletida tende a acusar correspondência para qualquer pulso refletido, especular ou espalhado, mesmo que não seja proveniente do pulso incidente medido.

Por outro lado, o produto entre sinais indica a correspondência instantânea entre eles, sendo que quanto mais se sobrepõem, maior é o resultado em dado instante. Ademais, o produto entre sinais impulsivos suprime pulsos não sobrepostos, pois a amplitude de um deles é nula ou muito pequena, destacando os mais síncronos. Seja então o sinal incidente (Fig. 1 abaixo à esquerda) $p'_{i,0}(t) = A'_{i,0}\Lambda((t - t_0)/\delta t_{i,0})$, sincronizado (deslocado de $t_0 - t_{i,0}$) e ajustado na amplitude por $A'_{i,0}$, com o pulso especular do sinal refletido, $p_{r,0}(t) = A_0\Lambda((t - t_0)/\delta t_0)$, o produto entre o sinal refletido (sinal relacionado) e o incidente sincronizado (sinal padrão) resulta teoricamente no sinal de correspondência (Fig. 1 abaixo à direita)

$$p_r(t)p'_{i,0}(t) = A_0A'_{i,0}\Lambda\left(\frac{t-t_0}{\delta t_0}\right)\Lambda\left(\frac{t-t_0}{\delta t_{i,0}}\right) \quad (7).$$

Então, obtém-se um pulso misto entre a parte refletida especular e a incidente, sendo eliminada a parte espalhada subsequente e não correspondente. Para tal, deve haver pouca ou nenhuma sobreposição entre os pulsos refletidos espalhados e o incidente. Para normalizar o sinal de correspondência, ele é comparado ao quadrado do sinal incidente sincronizado e ajustado na amplitude, servindo como o sinal padrão de semelhança temporal, $p_{i,0}^2(t) = A_{i,0}^2\Lambda^2((t - t_0)/\delta t_{i,0})$.

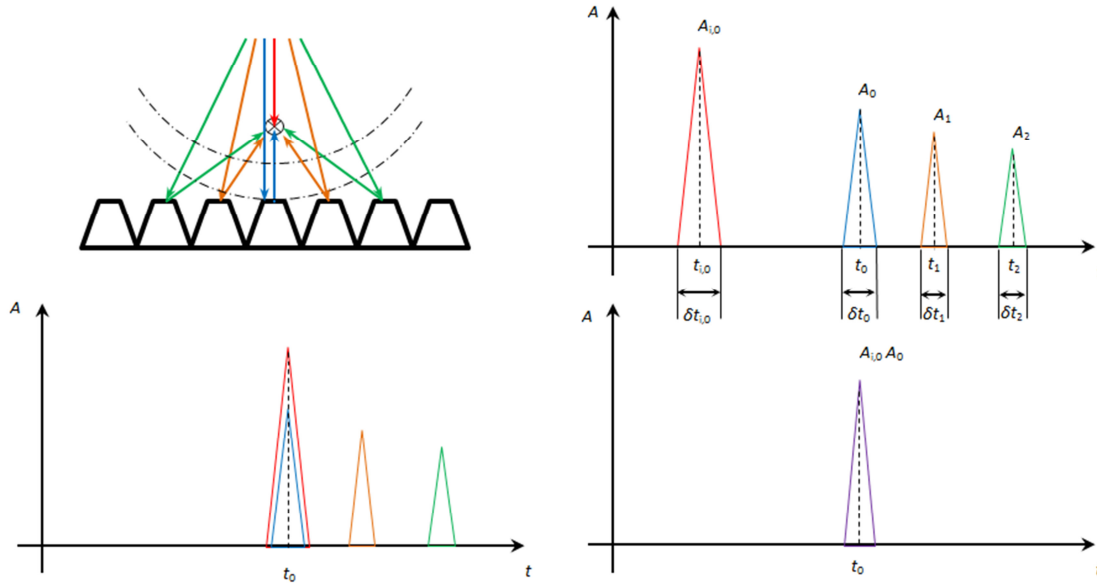


Figura 1: Superfície corrugada sob incidência de frente de onda e caminhos dos pulsos incidente e refletidos (acima à esquerda). Resposta impulsiva: pulsos incidente e refletidos (acima à direita). Pulso incidente sincronizado com o especular (abaixo à esquerda). Sinal de correspondência (abaixo à direita).

Portanto, sendo $P'_{i,0}(f)$ e $P_r(f)$ os espectros de $p'_{i,0}(t)$ e $p_r(t)$ respectivamente, uma medida normalizada da correspondência entre esses sinais na frequência, é a razão entre a convolução entre os espectros refletido e incidente ($C'_{i,0}(f)$) e a autoconvolução do incidente ($C'_{i,0*i,0}(f)$)

$$F_{r,i,0}(f) = \frac{\text{FT}[p_r(t) p'_{i,0}(t)]}{\text{FT}[p'_{i,0}(t) p'_{i,0}(t)]} = \frac{P_r(f) * P'_{i,0}(f)}{P'_{i,0}(f) * P'_{i,0}(f)}$$

$$F_{r,i,0}(f) = \frac{C'_{r*i,0}(f)}{C'_{i,0*i,0}(f)} \quad (8).$$

Aqui se denomina essa razão de fator de reflexão correspondente de ordem 0 ($F_{r,i,0}(f)$), um parâmetro adimensional para avaliar na frequência o quanto o sinal ou pulso refletido especular é relacionado ao incidente sincronizado. Como qualquer pulso refletido simples (i.e., sem sobreposição com outros) deve ter amplitude igual ou menor que a do incidente, tem-se sempre $|F_{r,i,0}(f)| \leq 1$. Além disso, pode-se determinar parâmetros similares de ordem n ($F_{r,i,n}(f)$), referentes a outros sinais incidentes medidos em regiões adjacentes ($p_{i,n}(t)$), conquanto haja pouca ou nenhuma sobreposição entre os pulsos espalhados das respectivas ordens de reflexão ($p_{r,n}(t)$).

3. ARRANJO EXPERIMENTAL

O parâmetro apresentado foi determinado a partir de dados experimentais obtidos de medições realizadas em [3]. Então, nesta investigação foram utilizadas duas amostras de superfícies corrugadas periódicas (Fig. 2.a), uma de perfil quadrado e outra triangular, além de uma superfície lisa (Fig. 2.b). Elas foram feitas de placas de madeira com dimensões retangulares (2,10 m x 1,48 m) (Fig. 2.a). Em uma das faces de cada amostra, foram periodicamente espaçados 21 caibros longos de 1,48 m, formando perfis corrugados ao longo da maior dimensão das placas. Assim, tem-se para as corrugações período $\Delta = 10$ cm, altura $H = 5,5$ cm, largura $b = 5$ cm para o perfil quadrado e base $b = 10$ cm para o triangular (Fig. 2.d). A face oposta à corrugada é uma superfície lisa, junto à qual também foram efetuadas medições, com uma amostra virada. Todas as superfícies foram revestidas por fórmica para promover boa reflexão sonora.

As amostras foram deitadas alternadamente no piso de uma câmara laboratorial grande o suficiente e sem obstáculos próximos aos pontos de medição, para que reflexões espúrias não contaminassem os sinais de interesse e pudessem ser facilmente eliminadas. Respostas impulsivas foram medidas com um microfone de 1/4", posicionado a $l = 13$ cm acima da



região central das amostras (Fig. 2.c). Para as amostras corrugadas, inicialmente o microfone foi colocado sobre um caibro (ressalto), sendo também realizadas medições sobre uma quina desse resalto e sobre um rebaixo adjacente (Fig. 2.d). Uma fonte sonora direcional foi suspensa alinhada ao microfone sobre a região central das superfícies a uma distância de $L = 1,77$ m, para incidência normal, emitindo sinal sweep, numa faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz, para obtenção de resposta impulsiva (Fig. 2.a e Fig. 2.b). Medições preliminares permitem considerar propagação de onda esférica para a distância fonte-microfone. A excitação e medição dos sinais foram controladas e processadas pelo programa computacional Monkey Forest (MF).

Visando obter sinais incidentes sem reflexões, foram também realizadas medições sem amostras e longe de qualquer superfície. Além de medição de incidência normal a $L' = 1,75$ m da fonte, foram ainda obtidos sinais incidentes adjacentes oblíquos, levando em consideração a direcionalidade da fonte. Para tal, transladou-se o microfone perpendicularmente ao eixo central da fonte, na direção que se alinha às corrugações, efetuando-se medições sem amostra em distintas posições adjacentes ao eixo. Pode-se então sincronizar adequadamente esses pulsos incidentes e ajustá-los aos refletidos obtidos, especulares e espalhados.

4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados das medições. Na Fig. 3, tem-se os registros temporais das partes refletidas $p_r(t)$ dos perfis

liso ($p_{r,l}(t)$), quadrado ($p_{r,q}(t)$) e triangular ($p_{r,t}(t)$), medidos sobre o centro das amostras (nas superfícies corrugadas sobre o resalto central). A unidade da amplitude é arbitrária, já que serão obtidos parâmetros adimensionais. Para a superfície lisa, a reflexão compreende apenas os pulsos especulares, ocorrendo em torno de $t_0 = 5,50$ ms ($= (L+l)/c$, sendo $c = 346$ m/s a velocidade do som). Já para as corrugadas, além desses com menor amplitude, tem-se pulsos de reflexão espalhada consecutivos, que são consideravelmente maiores para a triangular. É traçado também o sinal incidente normal, $p'_{i,0}(t)$, obtido sem amostras, já sincronizado ao primeiro pulso de reflexão especular em t_0 e corrigido na amplitude, multiplicando-a pelo fator $t'_{i,0}/t_0 = 0,92$ ($t'_{i,0} = 5,1$ ms $= L'/c$), para compensar o decaimento geométrico por propagação esférica. Esse mesmo sinal incidente sem amostra já ajustado também foi utilizado, através de subtração, para eliminar a parte incidente das respostas impulsivas com amostras em $t_{i,0} = 4,77$ ms ($= (L-l)/c$). Já que há imperfeições intrínsecas a esse procedimento, são notados alguns resquícios nesse instante nos registros de reflexão.

O sinal incidente sobreposto, $p'_{i,0}(t)$, é então multiplicado por cada um desses sinais refletidos, além de por si mesmo, obtendo-se os sinais de correspondência e o quadrado do incidente, apresentados na Fig. 4. Novamente, a dimensão da amplitude é arbitrária. Assim, os pulsos especulares são selecionados e os espalhados atenuados, indicando os instantes e a intensidade de correspondência entre os sinais de incidência e de reflexão. Tem-se que

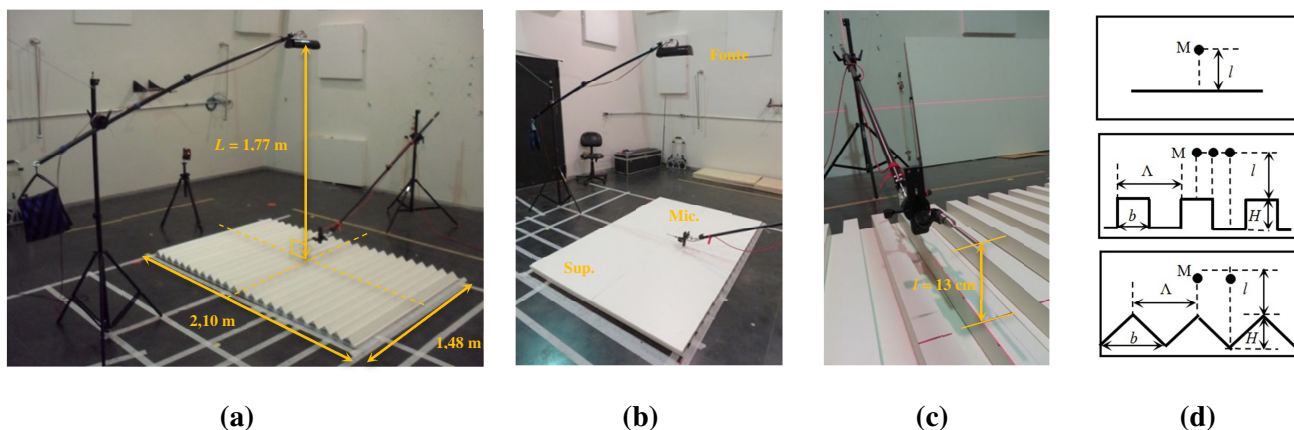


Figura 2: Superfícies e parâmetros dimensionais: corrugada (a) e lisa (b). Microfone sobre o resalto central (c) e posições de medição sobre os perfis (d): liso (acima), perfil quadrado (meio) e perfil triangular (abaixo).

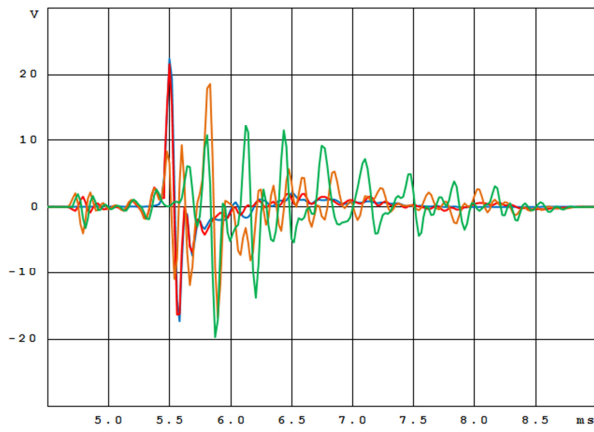


Figura 3: Sinais $p_{i,0}'(t)$ (rubro), $p_{r,l}(t)$ (azul), $p_{r,q}(t)$ (ocre) e $p_{r,t}(t)$ (verde).

o sinal de reflexão do perfil liso assemelha-se bastante ao incidente, enquanto que o do perfil quadrado apresenta alguma correspondência e o do triangular quase nenhuma, já que nesse caso o ressalto central é uma quina com pouca superfície para a reflexão direta do pulso incidente normal. Ademais, os resquícios das subtrações da parte incidente nos sinais de reflexão foram suprimidos com essa operação, pois $p_{i,0}'(t)$ possui amplitude quase nula antes da ocorrência dos respectivos pulsos. Por outro lado, embora haja boa atenuação de pulsos espalhados nos sinais refletidos de superfícies difusoras, pode-se observar que a supressão não é total, ocorrendo alguns pulsos residuais, já que o incidente possui um certo decaimento temporal que se sobrepõe a esses pulsos.

Aplicando janelamento temporal adequado aos sinais, eliminam-se, após os pulsos de interesse, reflexões espúrias tardias de outros obstáculos e dos cantos das amostras, que podem adulterar os resultados. Assim, são traçados na Fig. 5, os espectros dos sinais, entre 100 Hz e 1 kHz, antes da multiplicação por $p_{i,0}'(t)$. A amplitude é dada em decibel em relação a uma amplitude efetiva unitária. É observado como os espectros de reflexão das superfícies difusoras são parecidos com os da incidente e da superfície lisa em frequências mais baixas, porém nas altas contêm mais energia, ocorrendo ainda o efeito pente devido à interferência entre os picos de reflexão. Inclusive, o espectro de reflexão da superfície

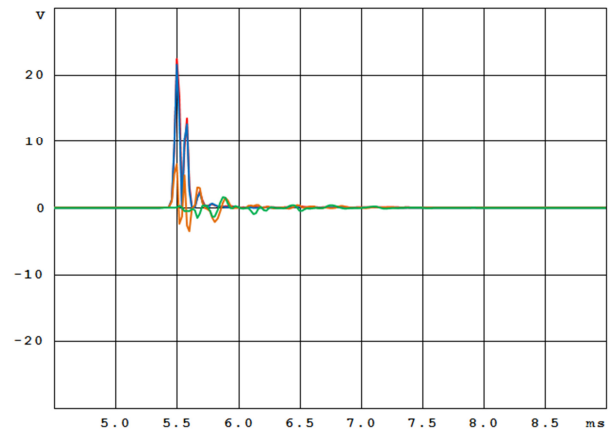


Figura 4: Sinais de correspondência $p_{i,0}'^2(t)$ (rubro), $p_{r,l}(t)p_{i,0}'(t)$ (azul), $p_{r,q}(t)p_{i,0}'(t)$ (ocre) e $p_{r,t}(t)p_{i,0}'(t)$ (verde)

lisa também possui pequenas ondulações (ripples) ao longo do espectro, atribuídas aos resquícios da subtração do pulso incidente. Na Fig. 6, estão os espectros dos sinais de correspondência, após o produto entre os sinais, isto é, a convolução entre espectros de reflexão e de incidência ($C_{r,i,0}'(f)$), além da autoconvolução deste ($C_{i,0,i,0}'(f)$). Por terem sido assim retirados componentes espalhadas, os espectros de correspondência são mais suaves, possuindo sempre menor amplitude do que o espectro da autoconvolução do sinal incidente, principalmente para o triangular. No entanto, ainda é possível ver algum efeito pente devido à presença de picos de espalhamento espúrios nos sinais, que não foram totalmente eliminados pela multiplicação temporal.

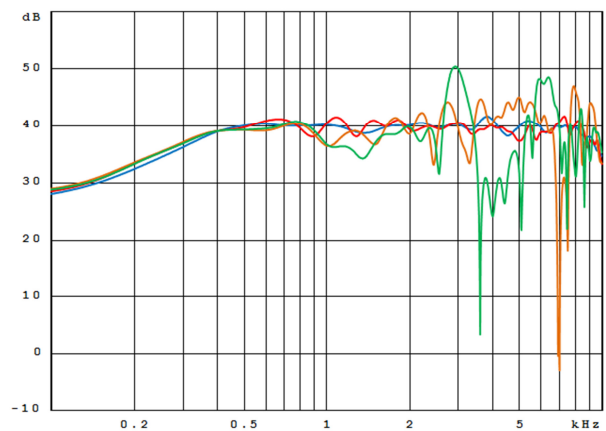


Figura 5: Espectros $P_{i,0}'(f)$ (rubro), $P_{r,l}(f)$ (azul), $P_{r,q}(f)$ (ocre) e $P_{r,t}(f)$ (verde).

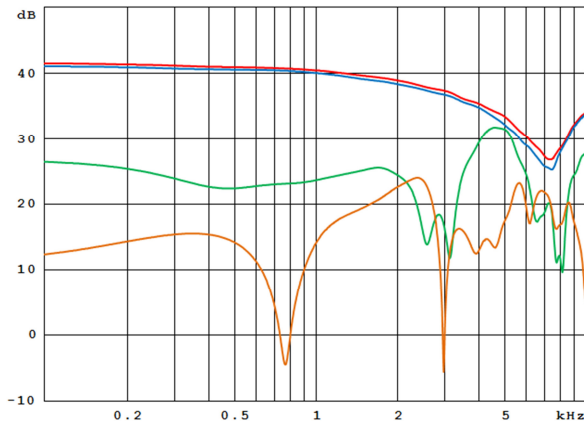
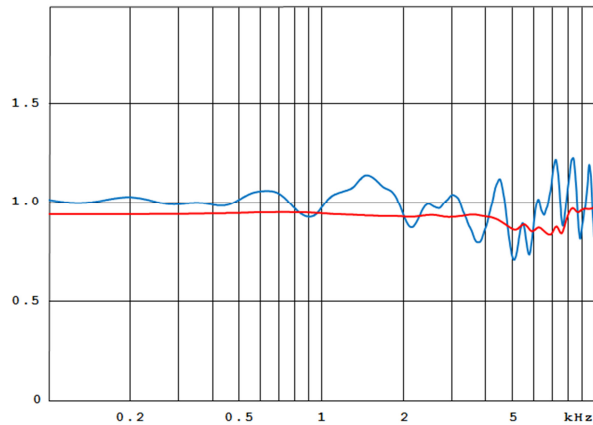


Figura 6: Espectros de correspondência $C'_{i,0*i,0}(f)$ (rubro), $C'_{r,l*i,0}(f)$ (azul), $C'_{r,q*i,0}(f)$ (ocre) e $C'_{r,t*i,0}(f)$ (verde).

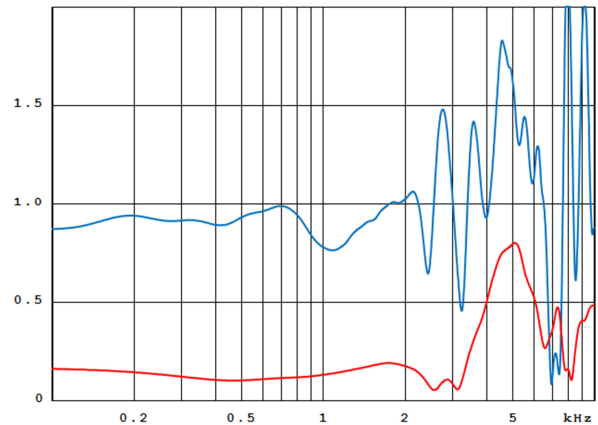
A partir dos espectros apresentados, para comparação são determinados os coeficientes de reflexão e os fatores de reflexão correspondente. Assim, nas Fig. 7 a seguir, tem-se esses parâmetros para perfil liso

(Fig. 7.a: $R_l(f)$ e $F_{r,i,0,l}(f)$), quadrado (Fig. 7.b: $R_q(f)$ e $F_{r,i,0,q}(f)$) e triangular (Fig. 7.c: $R_t(f)$ e $F_{r,i,0,t}(f)$).

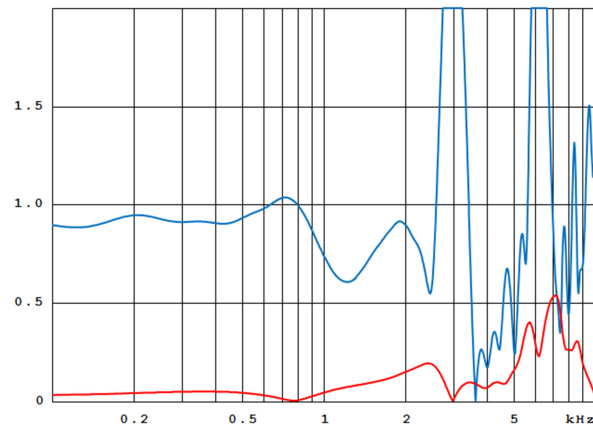
Até cerca de 800 Hz, o primeiro parâmetro ($R(f)$) possui valores próximos da unidade para todos os perfis, indicando grande reflexão sonora. Porém para frequências mais altas, observam-se valores muito oscilantes e comportamentos discrepantes já mencionados, sobretudo para os perfis corrugados. Por outro lado, o parâmetro proposto ($F_{r,i,0}(f)$) apresenta valores plausíveis menores do que a unidade ao longo de todo o espectro, até mesmo em altas frequências, já que os pulsos de espalhamento foram praticamente eliminados através do produto de sinais. O valor de $F_{r,i,0}$ é bem menor para os perfis corrugados (médias em torno de 0,3), principalmente para o triangular, como já esperado. É interessante notar como este parâmetro fornece valores ainda melhores inclusive para a superfície lisa, tendo em vista



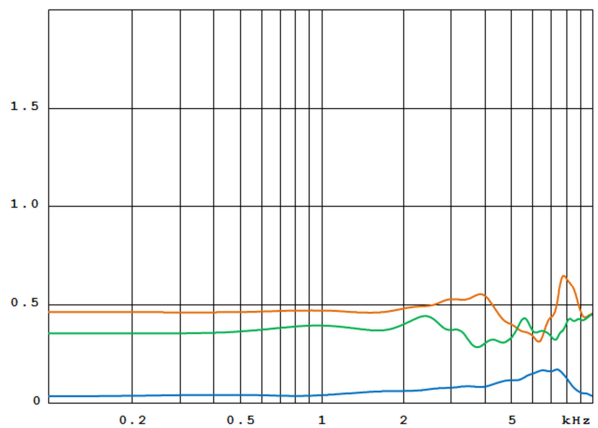
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7: $R(f)$ (rubro) e $F_{r,i,0}(f)$ (azul) para o perfil liso (a), quadrado (b) e triangular (c), além de $F_{r,i,3}(f)$ (d) para o perfil liso (azul) e o corrugado quadrado (ocre) e o triangular (verde).

que os resquícios das subtrações dos pulsos incidentes foram suprimidos nessa operação.

Utilizando os mesmos sinais de reflexão, foram também determinados fatores de reflexão correspondente para pulsos espalhados da 3ª ordem de reflexão ($F_{r,i,3}(f)$, Fig. 7.d), provenientes dos rebaixos adjacentes ao ressalto central dos perfis corrugados, ocorrendo em $t_3 = 5,83$ ms ($\approx(L+2H+l)/c$). Devido à simetria das amostras em relação ao eixo fonte-microfone, considera-se que tais pulsos espalhados são a combinação de dois pulsos refletidos sincronizados, cada qual de um pulso incidente nos rebaixos adjacentes ao ressalto central (Fig. 1 acima esq.). Então, para a determinação de $F_{r,i,3}(f)$, foram utilizados dois pulsos incidentes, medidos sem amostra à direita e à esquerda do eixo central da fonte ($p_{i,3,d}(t)$ e $p_{i,3,e}(t)$), sincronizados e ajustados adequadamente na amplitude, ou seja, $p'_{i,3}(t) = p'_{i,3,d}(t) + p'_{i,3,e}(t)$. Com esses mesmos pulsos incidentes em t_3 , também se determinou $F_{r,i,3}(f)$ para a amostra lisa, para avaliar o quanto este parâmetro responde quando não há sincronia entre pulsos refletidos simples e o incidente. Como esperado para o perfil liso, devido ao descompasso entre os pulsos de reflexão especular e de incidência adjacente e à ausência de espalhamento, o parâmetro tem valores muito pequenos ao longo do espectro com uma média de 0,10. No entanto, em vista do decaimento do pulso de reflexão especular se sobrepôr em certo grau ao incidente em questão, ocorrem valores de até 0,17 em torno de 7 kHz. Já para os perfis corrugados, em razão da sincronia entre o pulso incidente e os

refletidos espalhados do rebaixo central, os valores de $F_{r,i,3}(f)$ são bem maiores do que os de $F_{r,i,0}(f)$, ou seja, há melhor correspondência, apresentando médias de 0,48 para o perfil quadrado e 0,38 para o triangular.

Por fim, para analisar como o parâmetro responde à incidência normal em regiões adjacentes ao ressalto central, $F_{r,i,0}(f)$ foi determinado com as respostas impulsivas obtidas posicionando o eixo fonte-microfone sobre uma quina do ressalto central do perfil quadrado e sobre um rebaixo central de ambos os perfis corrugados (Fig. 2.d). Assim, na Fig. 8 estão as partes refletidas das respostas sobre uma quina do perfil quadrado ($p_{r,q,q}(t)$), sobre um rebaixo do perfil quadrado ($p_{r,q,q}(t)$) e sobre um rebaixo do perfil triangular ($p_{r,q,q}(t)$). Já na Fig. 9, tem-se os respectivos parâmetros $F_{r,i,0}(f)$ ($F_{r,i,0,q,q}(f)$, $F_{r,i,0,q,r}(f)$ e $F_{r,i,0,t,r}(f)$) para incidência normal sobre essas regiões.

Na Fig. 8, observa-se que, para um mesmo perfil (quadrado ou triangular), as partes refletidas são alteradas quando a incidência normal se dá sobre diferentes regiões de um período central. Isso é devido não só à própria região de incidência normal, mas também à reflexão espalhada das corrugações adjacentes a ela. Embora os pulsos especulares das respostas impulsivas assim obtidas apresentem certa correspondência mútua, porém com intensidades diferentes, os pulsos espalhados já não correspondem tanto entre si (Fig. 8). Então, para um dado perfil, as curvas dos fatores de reflexão correspondentes para incidência normal, $F_{r,i,0}(f)$, sobre diferentes

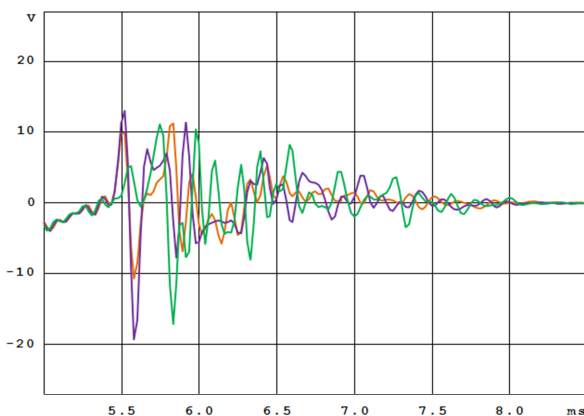


Figura 8: Sinais $p_{r,q,q}(t)$ (ocre), $p_{r,q,q}(t)$ (roxo), $p_{r,t,r}(t)$ (verde).

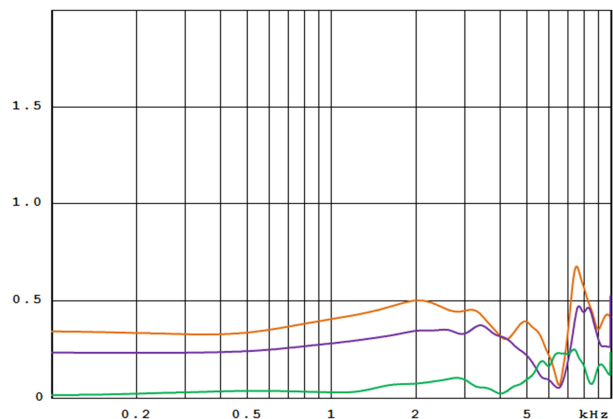


Figura 9: $F_{r,i,0}(f)$: $F_{r,i,0,q,q}(f)$ (ocre), $F_{r,i,0,q,r}(f)$ (roxo), $F_{r,i,0,t,r}(f)$ (verde).



irregularidades apresentam alguma semelhança entre si ao longo da frequência, porém com valores distintos (Fig. 9). Para o cálculo de $F_{r,i,0}(f)$, considera-se que para incidência normal sobre uma quina do ressalto central, a reflexão especular é devido somente a um único pulso incidente. Porém, para incidência normal sobre um rebaixo central, o mesmo pulso refletido é devido a dois pulsos incidentes, cada qual sobre os ressaltos adjacentes (Fig. 1 acima à esquerda), tal como no caso de $F_{r,i,3}(f)$ para incidência normal sobre um ressalto central (Fig. 7.d).

5. CONCLUSÕES

A correspondência entre sinais impulsivos de reflexão e incidência sonora sobre superfícies difusoras mostrou-se uma ferramenta interessante a se considerar para avaliar a reflexão sonora de tais superfícies. O proposto fator de correspondência entre esses sinais, devidamente sincronizados e ajustados na amplitude, é uma métrica que apresenta valores mais plausíveis e de fácil interpretação em relação ao usual coeficiente de reflexão para superfícies difusoras. Mesmo para superfícies planas, esse parâmetro resulta em valores ainda melhores, já que a multiplicação entre sinais impulsivos elimina partes não sincronizadas residuais de subtrações, que acabam contaminando os valores do coeficiente de reflexão. Embora os resultados das análises com dois tipos de perfis corrugados, além de uma superfície lisa, tenham se mostrado promissores, ainda há tópicos a serem mais investigados.

Por exemplo, o fato de que o sinal impulsivo de incidência não ser um pulso perfeitamente compacto, tendo certo decaimento que pode se sobrepor em parte a pulsos não sincronizados. Isso pode resultar em contaminação dos resultados, ou seja, pode ser registrada certa correspondência do pulso de incidência com pulsos espalhados mesmo que não sejam provenientes dele. Assim, dado um sinal impulsivo medido, pode-se investigar qual deve ser a distância mínima entre as corrugações ou irregularidades superficiais para que eventuais sobreposições com pulsos espalhados não adulterem tanto os resultados.

Outra questão a ser elucidada é como tratar os resultados para incidência sobre diferentes regiões de superfícies difusoras. Os resultados assim obtidos mostraram certas semelhanças entre si nas partes especulares. Nesse sentido, para se resultar num valor único, poderia ser realizada uma média de sinais de reflexão oriundos da incidência normal sobre diferentes partes das superfícies e efetuar a correlação cruzada com o sinal incidente ao longo de um intervalo de tempo que contemple a parte especular. A partir daí, poderia ser obtido um fator de correspondência único e mais sensato referente à parte de reflexão especular para incidência sobre diferentes regiões de superfícies difusoras. Essas e outras questões devem ser investigadas futuramente, podendo contribuir para a caracterização da reflexão e espalhamento sonoro de superfícies difusoras.

REFERÊNCIAS

- [1] Brandão, Eric e Lenzi, Arcanjo. Uma revisão sobre os métodos de medição in situ da impedância acústica de superfície. *Acústica e Vibrações*, 41, p. 3-12, dez. 2009.
- [2] Darmon, Michael; Dorval, Vincent e Baqué, François. Acoustic scattering models from rough surfaces: a brief review and recent advances. *Applied Sciences*, 10, 2020.
- [3] Pazos, Daniel F. P. e Musafir, Ricardo E. Medição da reflexão sonora de superfícies corrugadas com o método de dois microfones. Em XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Sobrac, 2017, Brasília, DF, 2017.
- [4] Wu, T.; Lam, Y. W. e Cox, T. J. Measurement of non-uniform surface by the two microphone method. Em 17th International Congress on Acoustics – 17th ICA, Rome, 2001.
- [5] Lauriks, W.; Jansens, G.; De Geetere, L. et al. Evaluation of free field techniques for the measurement of the surface impedance of sound absorbing materials. 17th International Congress on Acoustics – 17th ICA, Rome, 2-7, 2001.
- [6] Higuti, Ricardo T. e Kitano Claudio. Sinais e Sistemas. Versão 1.1, DEE-FEIS-UNESP, Ilha Solteira, SP, 2003. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/optoeletronica/sinais_e_sistemas.pdf
- [7] Sun, Zhen; Wang, Guocheng; Su, Xiaoping; Liang, Xinghui e Liu, Lintao. Similarity and delay between two non-narrow-band time signals, Cornell University, arXiv, Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing, 6 May 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2005/2005.02579.pdf>