



XL CILAMCE
IBERO-LATIN AMERICAN
CONGRESS ON
COMPUTATIONAL
METHODS IN
ENGINEERING

NOVEMBER
11-14, 2019
Praiaamar Natal Hotel & Convention
Natal, RN-BRAZIL

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE PERDA NA TRANSMISSÃO SONORA EM PAINÉIS DE FECHAMENTO SIMPLES, DUPLOS E EM MULTICAMADAS

COMPUTATIONAL TOOL FOR ANALYSIS IN SOUND TRANSMISSION LOSS ON SIMPLE, DOUBLE AND MULTILAYER CLOSING PANELS

Reinaldo C. Fortes

Rovadávia A. J. Ribas

reinaldofop@gmail.com

roviaaline@gmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto

MECON-DECIV-Escola de Minas-UFOP-Campus, 35400-000, MG/Ouro Preto, Brasil

Gustavo P. Guimarães

gustavo.paulinelli@gmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto

DECAT-Escola de Minas-UFOP-Campus, 35400-000, MG/Ouro Preto, Brasil

Abstract. As edificações construídas sob o sistema estruturado em aço podem apresentar problemas devido ao mau desempenho acústico quando são aplicados sistemas de fechamento industrializados. A flexibilidade e vibração excessiva da estrutura, aliadas à reduzida capacidade de isolamento sonora dos materiais dos fechamentos, que, em geral, são mais leves do que as tradicionais alvenarias, podem transmitir para os painéis, que compõem os sistemas de fechamento industrializados, vibrações que tendem a diminuir a perda na transmissão sonora da parede. Os transtornos são em geral complexos e levam a correções onerosas. No entanto, o desempenho acústico de um sistema de fechamento pode ser previsto e otimizado se aplicados, durante a fase de projeto, conceitos e tecnologias adequadas para a análise de sua resposta acústica. A perda na transmissão sonora é um parâmetro que permite a análise do desempenho acústico de sistemas de fechamento, mas sua estimativa envolve vários fatores, principalmente se sua aplicação envolver múltiplas camadas. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é elaborar um modelo computacional para a determinação da perda na transmissão sonora em função da frequência em sistemas de fechamento constituídos por painéis de fechamento industrializados simples e em multicamadas, com e sem absorvedores sonoros entre as placas que compõem os painéis em multicamadas. O modelo é desenvolvido em linguagem JAVA, utilizando a plataforma NetBeans e o banco de dados SQLite, e possui uma interface gráfica para a interação com o usuário de forma facilitada. A modelagem é baseada em um método gráfico, aplicado a painéis industrializados simples, duplos e em multicamadas, com e sem absorvedores sonoros entre as placas que compõem o sistema. Considera-se ainda a forma de fixação dos painéis, que é determinante na eficiência de sua transmissão sonora. A validação quantitativa do modelo computacional é realizada, comparando-se os resultados obtidos com trabalhos publicados, tendo o software apresentado resultados com diferença máxima de 1,5%, o que viabiliza sua utilização para uma rápida análise acústica de sistemas de fechamento industrializados.

Keywords: Construção em aço. Sistemas de fechamento. Perda na transmissão sonora. Modelo computacional.

1 Introdução

Os fechamentos industrializados aplicados em edificações estruturadas em aço tendem a ser mais leves e de montagem rápida. Entretanto sua capacidade de isolamento acústico deve ser avaliada, pois os painéis apresentam menor massa do que o fechamento tradicional em alvenaria de tijolo cerâmico [1,2]. E o desempenho acústico inadequado da edificação pode comprometer o conforto de seus usuários, tornando-se necessário conhecer ainda na fase de projeto a capacidade de isolamento sonora dos fechamentos industrializados disponíveis no mercado. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é elaborar um modelo computacional para a determinação da perda na transmissão sonora em função da frequência em sistemas de fechamento constituídos por painéis industrializados simples e constituídos por multicamadas, com e sem material absorvedor sonoro entre os painéis.

2 Perda na transmissão sonora de painéis de fechamento

A perda na transmissão sonora (PT), que ocorre quando o som atravessa um painel, é influenciada pela frequência do som incidente e pode indicar o desempenho acústico do material. No ar, a transmissão do som ocorre por meio de ondas longitudinais e, no meio sólido, as ondas mecânicas se propagam também por flexão.

2.1 Perda na transmissão sonora em painéis simples

A curva que representa a PT mostra quatro regiões distintas, conforme a massa e a rigidez do painel, tendo-se a região controlada pela rigidez, ressonância, massa e coincidência [3,4,5,6]. Na região de baixas frequências, controlada pela rigidez, a PT é controlada pela rigidez do material do painel e seu valor aumenta com a redução da frequência, até a frequência de ressonância. Na região da ressonância, a combinação construtiva de ondas de flexão que se propagam pelo painel e se refletem nas suas bordas é responsável pelas frequências de ressonância, e cada uma delas está associada a um modo de vibrar do painel [3,4]. Na região controlada pela massa, o painel tem dificuldade de vibrar mesmo com maior frequência incidente, elevando seu isolamento acústico e o controle sonoro é feito com base no princípio da Lei da Massa. Gerges apresenta a Lei da massa para o cálculo da PT em painel isotrópico, expressa a Eq. 1 [5]. Com a elevação da frequência do som, ocorre o fenômeno da coincidência ou igualdade de comprimentos de ondas, que vão se reduzindo no ar e se aproximam dos comprimentos de ondas de flexão do painel [3].

$$PT = 20 \log(Mf) - 47 \quad (dB) \quad (1)$$

Sendo f a frequência da onda incidente (Hz); M a massa específica superficial do material do painel (kg/m^2).

Em geral, as frequências dos sons estão acima da frequência de ressonância do painel, então, o controle sonoro é feito com base no princípio da Lei da Massa. O intervalo de aplicação da Lei da massa, considerando a frequência do som incidente, está entre a região controlada pela ressonância (baixas frequências) e a região controlada pela coincidência (altas frequências). Inicia-se o intervalo no dobro da frequência de ressonância ($2f_r$), terminando na metade da frequência crítica ($f_c/2$), onde ocorre uma queda brusca da perda na transmissão [4]. A frequência de ressonância (f_r) e a frequência de coincidência (f_c) são obtidas por meio das Eq. 2 e 3.

$$f_{r_{i,j}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B_s}{M} \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right)} \quad (Hz) \quad i,j: 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (2)$$

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B_s}} \quad (Hz) \quad (3)$$

Sendo c a velocidade do som no ar (m/s); M a massa específica superficial do material da parede (kg/m²); E o módulo de elasticidade do material do painel (N/m²); a e b as dimensões do painel (m); B_s a rigidez à flexão do painel (N.m), expressa pela Eq.4.

$$B_s = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (N.m) \quad (4)$$

Sendo h a espessura do painel (m) e ν o coeficiente de Poisson.

Um método gráfico pode ser utilizado para estimar a PT de painéis simples. Essa estimativa ocorre na região controlada pela coincidência [3]. Observa-se, na Figura 1, o comportamento da curva da PT de painéis simples isotrópicos (sólidos e homogêneos) em função da frequência.

O ponto A possui coordenadas $(0,5f_c, PT_A)$ e o ponto B possui coordenadas (f_c, PT_B) . PT_A e PT_B são obtidos por meio das Eq. 5 e Eq. 6 [3].

$$PT_A = 20 \log(Mf_c) - 54 \quad (dB) \quad (5)$$

$$PT_B = 20 \log(Mf_c) + 10 \log \eta - 45 \quad (dB) \quad (6)$$

Sendo f_c a frequência crítica do painel (Hz); η o fator de amortecimento interno do material do painel.

A partir das coordenadas do ponto B , a PT pode ser obtida pela Eq. 7, válida para $f > f_c$, utilizada até que a perda na transmissão sonora fique igual à perda na transmissão sonora obtida pela Lei da massa (BISTAFA, 2011).

$$PT = 20 \log(Mf) + 10 \log \left(\eta \frac{f}{f_c} \right) - 45 \quad (dB) \quad (7)$$

2.2 Perda na transmissão sonora em paredes duplas

Um sistema de fechamento constituído por painéis duplos com material absorvedor de som entre eles (multicamadas) possuem maior PT do que paredes simples constituídas por uma camada na mesma espessura da parede em multicamadas [4]. A determinação da curva da PT torna-se complexa quando se tratam de paredes compostas por painéis flexíveis em multicamadas [3]. Entretanto, ela pode mostrar qual região mais influencia na PT e o isolamento sonoro deve ser calculado considerando-se as diferentes bandas de frequências, dimensionando-se o sistema de fechamento de modo a se obter maior PT para a faixa de frequência desejada.

Bies e Hansen [3] e Bistafa [4] apresentam dois métodos gráficos simplificados para o traçado da curva da PT em função da frequência do som incidente, para serem aplicados a painéis simples e em multicamadas, respectivamente, com ou sem absorvedor de som entre eles (Fig. 1 e Fig. 2). Os autores consideram também o tipo de fixação dos painéis.

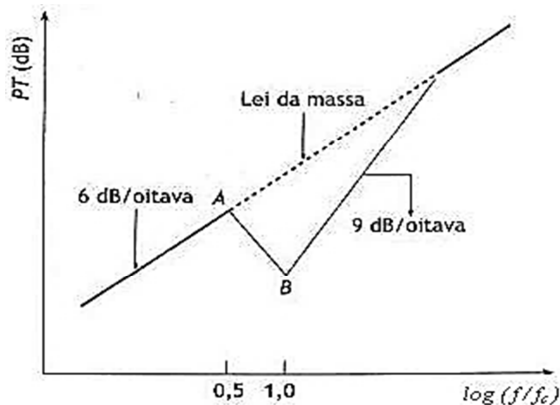


Figura 1. Estimativa da PT em painéis simples [3]

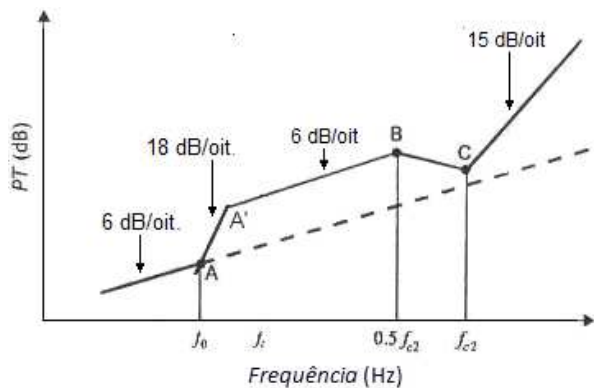


Figura 2. Estimativa da PT em painéis em multicamadas [3]

As coordenadas do ponto A (f_0 , PT_A), sendo f_0 a menor frequência de ressonância, e PT_A perda na transmissão sonora no ponto A, são obtidos por meio das Eq. 8 e Eq. 9.

$$f_0 = 80 \left(\frac{M_1 + M_2}{dM_1M_2} \right)^{1/2} \quad (\text{Hz}) \quad (8)$$

$$PT_A = 20 \log(M_1 + M_2) + 20 \log f_0 - 48 \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

A abcissa do ponto B é a metade da frequência crítica do segundo painel ($0,5f_{c2}$), sendo f_{c2} encontrado pela Eq. 3. O cálculo da ordenada desse ponto, a perda na transmissão sonora no ponto B (PT_B), torna-se mais complexo, pois deve-se considerar se há material absorvedor entre os painéis e os efeitos de fixação dos painéis, que são determinantes no cálculo de sua eficiência acústica [4].

Quando não há material absorvedor de som na cavidade, PT_B é igual a PT_{B1} dada pela Eq.10.

$$PT_{B1} = PT_A + 20 \log \left(\frac{f_{c1}}{f_0} \right) - 6 \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

Quando o painel é fixado diretamente no caibro ou perfil metálico, gera-se uma linha de contato entre esses elementos formando-se a fixação em linha. A fixação por meio de barras resilientes é denominada fixação pontual. Geram-se assim as combinações de fixação: linha-linha (LL), linha-pontual (LP), pontual-linha (PL) e pontual-pontual (PP). O espaçamento entre os caibros ou perfis (b_c) e o espaçamento entre parafusos (e) são supostos uniformes (Fig. 3) [4].

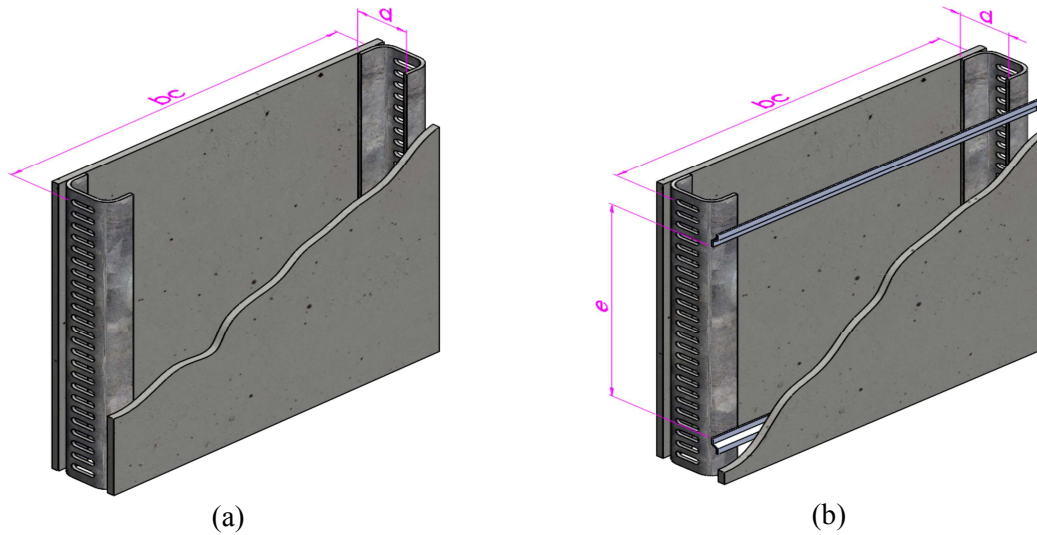


Figura 3. Fixação em linha (a) e fixação pontual (b) [4]

Quando há material absorvedor de som na cavidade entre os painéis, PT_B é dada pelo maior valor entre PT_{B1} e PT_{B2} , acrescido de 4, sendo PT_{B2} dada conforme o tipo de fixação:

i. Fixação linha-linha:

$$PT_{B2} = 20 \log M_1 + 10 \log b_c + 30 \log f_{c2} + 20 \log \left[1 + \frac{M_2 f_{c1}^{1/2}}{M_1 f_{c2}^{1/2}} \right] - 78 \quad (11)$$

ii. Fixação linha-pontual:

$$PT_{B2} = 20 \log(M_1)e + 40 \log(f_{c2}) - 99 \quad (12)$$

iii. Fixação pontual-pontual:

$$PT_{B2} = 20 \log(M_1)e + 40 \log(f_{c2}) + 20 \log \left[1 + \frac{M_2 f_{c1}}{M_1 f_{c2}} \right] - 105 \quad (13)$$

A abscissa do ponto C é obtida com a Eq. 3, aplicada ao segundo painel. A ordenada é dada pela Eq. 14 ou Eq.15, dependendo da relação entre as frequências críticas dos painéis.

$$a) \text{ Para } (f_{c2} \neq f_{c1}): \quad PT_C = PT_B + 10\log\eta_2 + 6 \quad (14)$$

$$b) \text{ Para } (f_{c2} = f_{c1}): \quad PT_C = PT_B + 10\log\eta_2 + 5\log\eta_1 + 6 \quad (15)$$

As coordenadas do ponto A' ($f_{A'}$, $PT_{A'}$) são obtidas a partir do valor de acréscimo por banda de oitava. A reta do ponto A ao ponto A' acresce 18 dB por banda de oitava e a reta do ponto A' ao ponto B acresce 6 dB por banda de oitava (Figura 2), determinando-se assim as Eq. 16 e Eq. 17.

$$f_{A'} = 10^{\left(\frac{59,794 * \log(f_0) - 19,931 * \log\left(\frac{f_{c2}}{2}\right) - PT_A + PT_B}{39,863}\right)} \quad (16)$$

$$PT_{A'} = 59,794 * \log\left(\frac{f_{A'}}{f_0}\right) + PT_A \quad (17)$$

3 Método

O modelo computacional para a determinação da PT é desenvolvido em linguagem JAVA, utilizando a plataforma NetBeans e o banco de dados sqLite, e possui uma fácil interface gráfica com o usuário. A modelagem é baseada no método gráfico, detalhado em Bies e Hansen [3] e Bistafa [4], aplicado a painéis industrializados simples, duplos e em multicamadas, com e sem absorvedores sonoros entre as placas que compõem o sistema.

Considera-se ainda a forma de fixação dos painéis, que é determinante na eficiência de sua transmissão sonora. Foram estabelecidos alguns pré-requisitos para o desenvolvimento do software, tais como, possuir interface intuitiva e possibilitar manusear os dados dos materiais utilizados nos painéis; salvar as análises realizadas; gerar gráficos e gerar relatório de dados. Na Figura 4 mostra-se o fluxograma com a sequência lógica e as considerações aplicadas no desenvolvimento do modelo para a estimativa da PT

A interface principal do modelo computacional, denominado PERDA NA TRANSMISSÃO SONORA, está mostrada na Figura 5. A parte superior da tela, região contornada em traço contínuo na cor azul, contém os campos que possibilitam a montagem de novas análises, preenchendo-se os campos: Nome da Análise, Tipo de Painel, Método de Análise, Tipo de Ligação, Material do primeiro painel, Material Absorvedor, Material do segundo painel, Espessuras e Dimensões do painel.

Na parte inferior da tela (Figura 5), região contornada em traço não contínuo e cor vermelha, tem-se a lista de configurações salvas, campos de seleção para comparação e botões de comando: Salvar nova análise, Limpar campos, Excluir análise, Gerar gráfico e Gerar relatório de dados. Nessa região é possível manipular os nomes das análises e selecioná-las para analisar e comparar os resultados em gráfico ou em relatório de dados.

Ao clicar no botão “Selecionar” da tela principal, abre-se a interface secundária “Selecione o Material”, que possibilita a manipulação de dados dos materiais utilizados nos painéis. Essa tela pode ser visualizada na Figura 6. Observam-se, também, os botões de comando que permitem a manipulação de dados, com a inserção de outros materiais na base de dados do programa: Incluir, Excluir, Alterar, Salvar, Cancelar, Selecionar e Fechar.

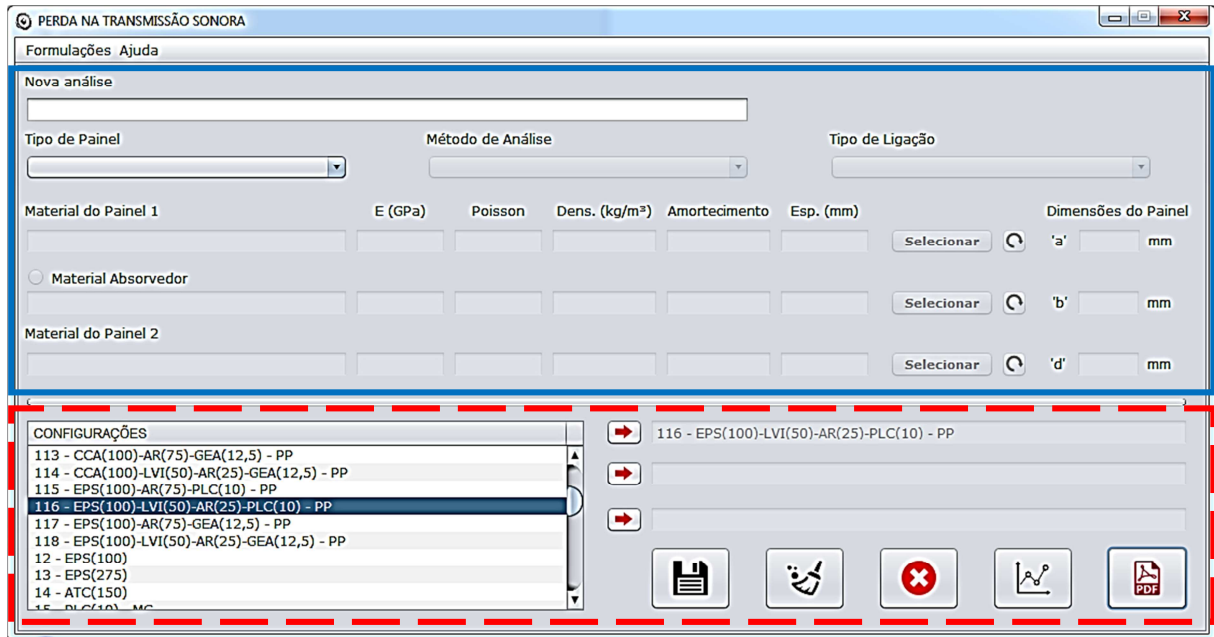


Figura 5. Interface principal do modelo PERDA NA TRANSMISSÃO SONORA [8]

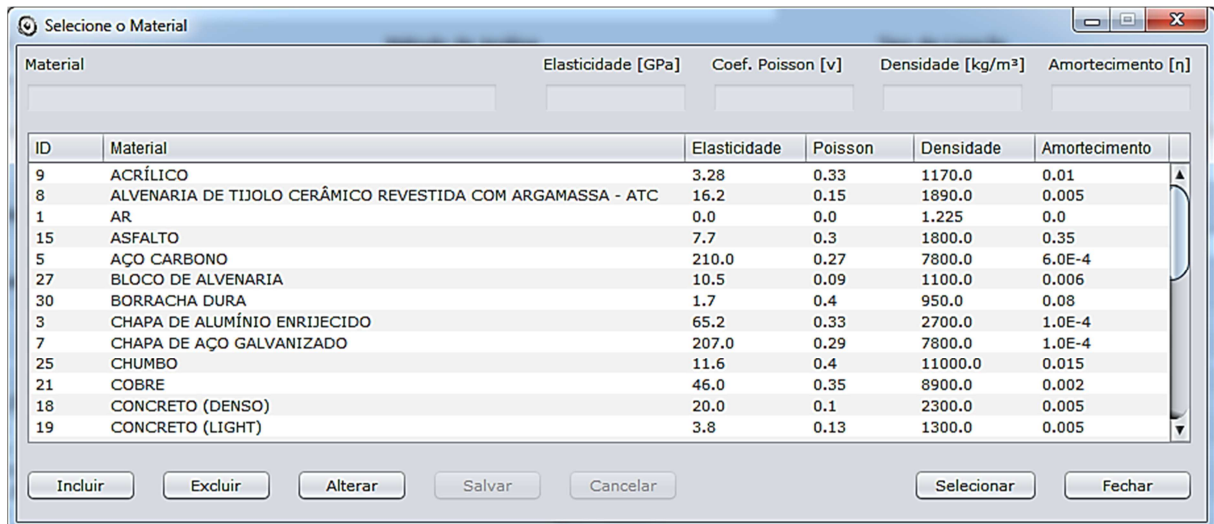


Figura 6. Interface secundária para selecionar os materiais [6,7,8]

4 Resultados

Para validar o modelo computacional são traçadas curvas da PT em função da frequência, considerando-se os mesmos painéis simples e em multicamadas analisados por Ribas [7]. Os resultados podem ser obtidos na forma gráfica ou em relatórios. Os materiais que compõem os painéis são apresentados na Tabela 1. Para a configuração dos painéis, o nome de cada um é indicado por uma sigla seguida das espessuras (em milímetros) entre parênteses. Nas Tabelas 2 a 6, em itálico estão os resultados apresentados por Ribas [7] e em negrito os valores obtidos com o *software* desenvolvido.

4.1 Painel simples

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da PT dos painéis simples aplicando o método gráfico e o modelo computacional. Na Figura 7 apresentam-se graficamente os valores da perda na transmissão sonora em função da frequência pelo Método gráfico (MG) aplicado aos painéis simples PLC(100)

na cor azul, GEA(12,5) na cor vermelha e ATC(150) na cor verde, sendo que a linha tracejada representa a extensão da Lei da massa a partir do ponto 'A' de cada material.

Tabela 1. Materiais utilizados nos painéis avaliados [1,3, 7]

Materiais dos painéis	E (N/m ²)	ρ (kg/m ³)	η	v
Alvenaria de tijolo cerâmico revestida com argamassa (ATC)	1,62 x 10 ¹⁰	1890	0,005	0,15
Concreto celular autoclavado (CCA)	1,35 x 10 ⁹	500	0,015	0,15
Gesso acartonado (GEA)	2,00 x 10 ⁹	750	0,006	0,20
Poliestireno expandido com argamassa projetada (EPS)	2,50 x 10 ⁶	960	0,005	0,08
Placa cimentícia (PLC)	1,20 x 10 ⁸	1330	0,005	0,20
Pré-moldado de concreto maciço (PMC)	2,30 x 10 ¹⁰	2400	0,020	0,20

Tabela 2. Resultados da PT em painéis simples pelo método gráfico [7,8]

Material e espessura (mm)	Frequência no ponto A (Hz)	Frequência no ponto B (Hz)	PT _A (dB)	PT _B (dB)	Queda da PT (dB)
PLC(10)	10579 / 10579	21158 / 21158			
PLC(12)	8816 / 8816	17631 / 17632	55 / 56	41 / 41	14 / 15
PLC(100)	1058 / 1058	2116 / 2116			
GEA(12,5)	1557 / 1557	3113 / 3114			
GEA(15)	1297 / 1297	2595 / 2595	35 / 36	22 / 22	13 / 14
GEA(100)	195 / 195	389 / 389			
PMC(75)	137 / 137	274 / 274			
PMC(100)	103 / 103	205 / 205	40 / 41	32 / 32	8 / 9
CCA(100)	195 / 195	390 / 390	32 / 33	23 / 23	9 / 10
CCA(275)	71 / 71	142 / 142			
EPS(100)	6335 / 6335	12670 / 12670	68 / 69	54 / 54	14 / 15
ATC(150)	73 / 73	146 / 146	38 / 39	24 / 24	14 / 15

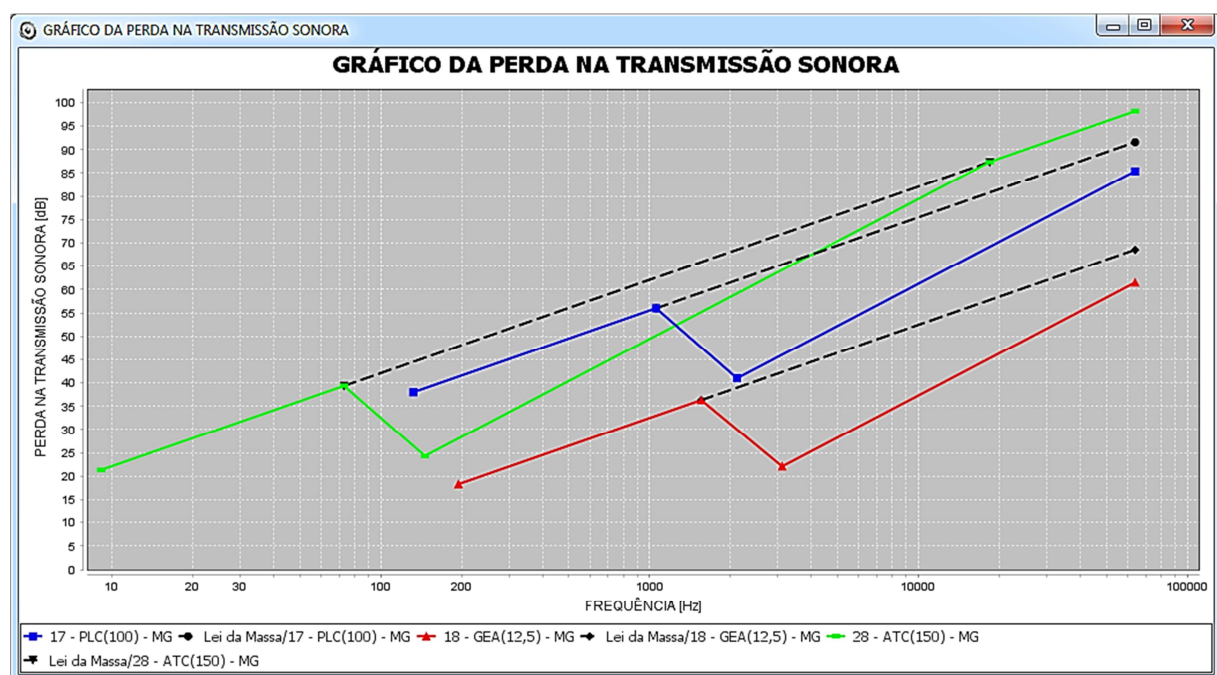


Figura 7. PT pelo método gráfico para PLC(100), GEA(12,5) e ATC(150) [7,8]

4.2 Painéis duplos

Para configurar os painéis duplos, em seus nomes estão indicados o tipo de material e espessuras (em mm) do primeiro painel, material absorvedor (quando houver), ar e material do segundo painel. O material absorvedor utilizado nas análises é a lã de vidro. Foram adotados os valores de 0,6 m de largura e 0,6 m de comprimento para todas as configurações de painéis duplos.

4.2.1 Painéis duplos com materiais iguais – Sem absorvedor sonoro

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da PT dos painéis duplos com materiais iguais, sem absorvedor sonoro, aplicando o método gráfico e o modelo computacional. Em itálico estão os resultados apresentados por Ribas [7], os valores em negrito são obtidos com o *software* desenvolvido.

O gráfico correspondente a uma configuração de painel duplos formado por PLC(12)-ar(90)-PLC(12), pode ser visualizado na Figura 8.

Tabela 3. Resultados obtidos da PT em painéis duplos com materiais iguais e sem absorvedor sonoro [7,8]

Configuração dos painéis	f_0 (Hz)	PT _A (dB)	$f_{C1} = f_{C2}$ (Hz)	Fixação LL, LP, PP		f_1 (Hz)	PT _D (dB)
				PT _B (dB)	PT _C (dB)		
PLC(10)-ar(75)-PLC(10)	<i>114</i>	<i>22</i>	<i>21158</i>	<i>61</i>	<i>32</i>	<i>733</i>	<i>69</i>
	113	22	21158	61	32	733	70
PLC(12)-ar(90)-PLC(12)	<i>95</i>	<i>22</i>	<i>17631</i>	<i>61</i>	<i>32</i>	<i>611</i>	<i>69</i>
	94	22	17632	61	32	611	70
GEA(12,5)-ar(75)-GEA(12,5)	<i>136</i>	<i>20</i>	<i>3113</i>	<i>41</i>	<i>14</i>	<i>733</i>	<i>63</i>
	135	20	3114	41	14	733	64
GEA(15)-ar(90)-GEA(15)	<i>113</i>	<i>20</i>	<i>2595</i>	<i>41</i>	<i>14</i>	<i>611</i>	<i>63</i>
	112	20	2595	41	14	611	64
PMC(75)-ar(75)-PMC(75)	<i>31</i>	<i>33</i>	<i>274</i>	<i>46</i>	<i>26</i>	<i>733</i>	<i>114</i>
	31	33	274	46	26	733	115
CCA(100)-ar(75)-CCA(100)	<i>59</i>	<i>27</i>	<i>390</i>	<i>38</i>	<i>16</i>	<i>733</i>	<i>91</i>
	58	27	390	38	16	733	93
EPS(100)-ar(75)-EPS(100)	<i>42</i>	<i>30</i>	<i>12670</i>	<i>74</i>	<i>45</i>	<i>733</i>	<i>103</i>
	42	30	12670	74	45	733	104

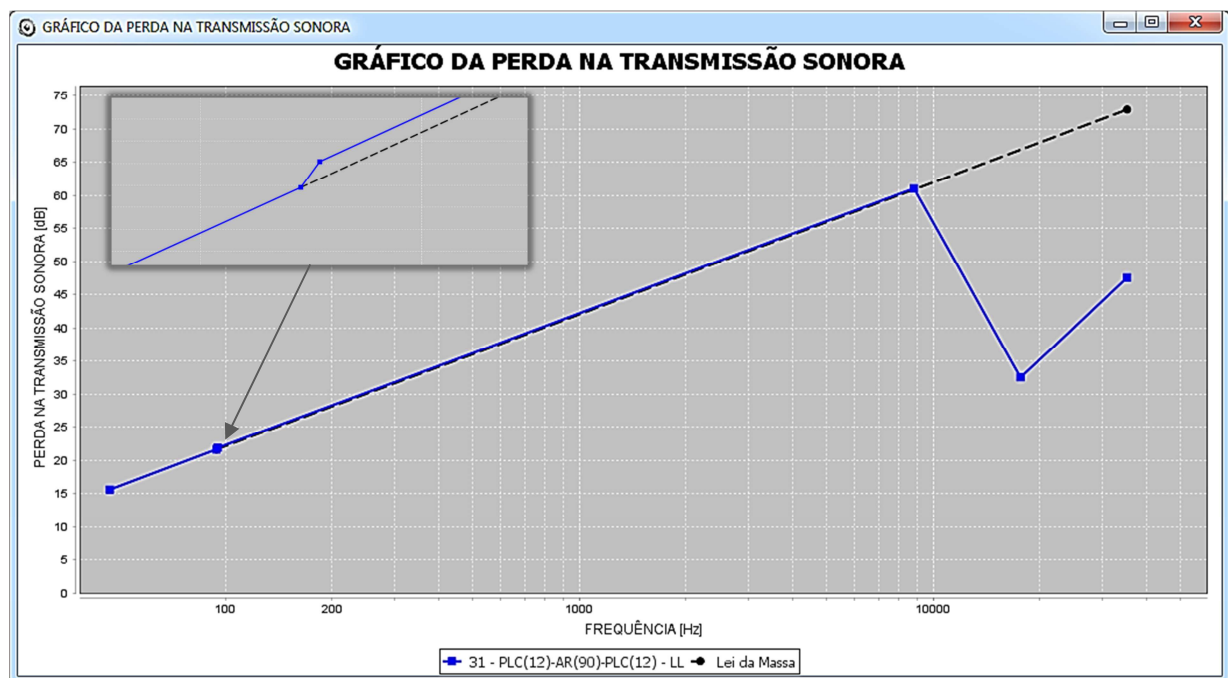


Figura 8. PT do painel duplo de materiais iguais, sem absorvedor sonoro, PLC(12)-ar(90)-PLC(12) [8]

Esse tipo de configuração de painel duplo apresenta quase nenhum ganho na perda na transmissão sonora em relação à extensão da Lei da massa, aproximadamente 0,2 dB (Figura 8). Isso porque é considerado somente ar na cavidade de 90 mm entre os painéis de PLC.

4.2.2 Painel duplo com materiais iguais – Com absorvedor sonoro

Acrescentando absorvedor sonoro entre os painéis duplos com materiais iguais obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4. Na Figura 9 apresenta-se o gráfico da perda na transmissão sonora do fechamento constituído por PLC(12)-LVI(50)-ar(40)-PLC(12).

Tabela 4. Resultados obtidos da PT em painéis duplos com materiais iguais e absorvedor sonoro [7,8]

Configuração dos painéis	f_0 (Hz)	PT_A (dB)	$f_{c1} = f_{c2}$ (Hz)	Tipo de fixação dos painéis						f_i (Hz)	PT_D (dB)
				LL		LP		PP			
				PT_B (dB)	PT_C (dB)	PT_B (dB)	PT_C (dB)	PT_B (dB)	PT_C (dB)		
PLC(10)-LVI(50)-ar(25)-PLC(10)	114 113	22 22	21158 21158	82 82	54 54	88 88	59 59	88 88	59 59	733 733	69 70
PLC(12)-LVI(50)-ar(40)-PLC(12)	95 94	22 22	17631 17632	81 81	53 53	85 85	57 57	85 85	57 57	611 611	69 70
GEA(12,5)-LVI(50)-ar(25)-GEA(12,5)	136 135	20 20	3113 3114	54 54	27 27	52 52	25 25	52 52	25 25	733 733	63 64
GEA(15)-LVI(50)-ar(40)-GEA(15)	113 112	20 20	2595 2595	53 53	26 26	50 50	23 23	50 50	23 23	611 611	63 64
PMC(75)-LVI(50)-ar(25)-PMC(75)	31 31	33 33	274 274	46 48	26 29	46 46	26 26	46 46	26 26	733 733	114 115
CCA(100)-LVI(50)-ar(25)-CCA(100)	59 58	27 27	390 390	38 42	16 20	38 38	16 16	38 38	16 16	733 733	91 93
EPS(100)-LVI(50)-ar(25)-EPS(100)	42 42	30 30	12670 12670	93 93	64 64	89 89	60 60	89 89	60 60	733 733	103 104

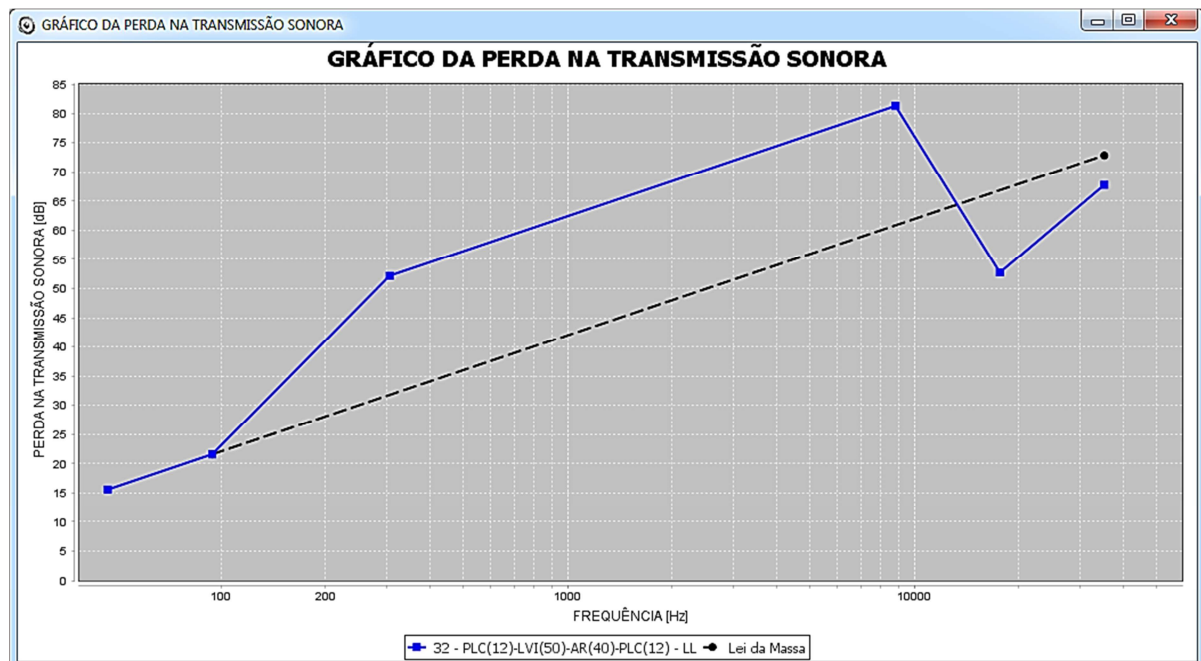


Figura 9: Perda na transmissão sonora do painel duplo de materiais iguais com absorvedor sonoro para PLC(12)-LVI(50)-ar(40)-PLC(12) [8]

Quando se utiliza o material absorvedor em painel duplo, deve-se considerar o tipo de fixação dos painéis, nesse caso, a fixação utilizada é linha-linha. Verifica-se a influência do absorvedor sonoro na configuração de painéis duplos. Há um ganho de perda na transmissão sonora entre PT_A e PT_B , se

comparado com a extensão da Lei da massa a partir de PT_A , apresentada em linha tracejada na cor preta (Figura 9). Essa diferença pode ser observada ao se comparar os gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9.

4.2.3 Painel duplo com materiais diferentes – Sem absorvedor sonoro

Em painéis duplos com materiais diferentes com ou sem absorvedor sonoro, a frequência crítica de cada painel deve ser considerada. O método gráfico é aplicado quando considera-se $f_{c1} \leq f_{c2}$. Desse modo, os painéis duplos que não atendem a esse requisito devem ter a ordem de montagem invertida. O software desenvolvido identifica e faz a inversão dos painéis automaticamente, porém o nome da configuração não é alterado e o usuário é alertado sobre a troca.

Na Tabela 5 mostram-se os resultados da PT de painéis duplos com materiais diferentes, sem absorvedor sonoro, também aplicando o método gráfico e o modelo computacional.

As montagens de painéis duplos com materiais diferentes sem absorvedor sonoro, utilizados para a validação do software, apresentaram valores da perda na transmissão no ponto “B” abaixo da perda na transmissão sonora calculada pela Lei da massa estendida a partir do ponto “A” e na mesma frequência do ponto “B”, impossibilitando a análise gráfica.

Tabela 5. Resultados obtidos da perda na transmissão sonora em painéis duplos com materiais diferentes, sem absorvedor sonoro [7,8]

Configuração dos painéis	f_0 (Hz)	PT_A (dB)	f_{c1} (Hz)	f_{c2} (Hz)	Tipo de fixação dos painéis			f_i (Hz)	PT_D (dB)
					LL	LP	PP		
					PT_B (dB)	PT_C (dB)			
PLC(10)-ar(75)-GEA(12,5)	125	21	3113	21158	43	26	733	67	
	125	21	3114	21158	43	26	733	67	
PLC(12)-ar(90)-GEA(15)	105	21	2595	17631	43	26	611	67	
	104	21	2595	17632	43	26	611	67	
PMC(75)-ar(75)-PLC(10)	84	36	274	21158	40	23	733	93	
	83	36	274	21158	40	23	733	93	
PMC(75)-ar(75)-GEA(12,5)	99	37	274	3113	40	24	733	90	
	98	37	274	3114	40	24	733	90	
CCA(100)-ar(75)-PLC(10)	91	27	390	21158	34	17	733	82	
	90	27	390	21158	34	17	733	82	
CCA(100)-ar(75)-GEA(12,5)	105	28	390	3113	33	17	733	79	
	104	28	390	3114	33	17	733	79	
EPS(100)-ar(75)-PLC(10)	86	31	12670	21158	69	52	733	87	
	85	31	12670	21158	69	52	733	87	
EPS(100)-ar(75)-GEA(12,5)	101	32	3113	12670	56	39	733	85	
	100	32	3114	12670	56	39	733	84	

4.2.4 Painel duplo com materiais diferentes – Com absorvedor sonoro

Na Tabela 6 mostram-se os resultados da PT de painéis duplos com materiais diferentes, com absorvedor sonoro.

Na Figura 10 mostra-se um gráfico com curvas da PT gerado pelo modelo computacional para um sistema de fechamento constituído por um painel composto por poliestireno expandido revestido por argamassa com 100mm de espessura (EPS(100)), lâ de vidro com 50mm de espessura (LVI(50)), uma camada de ar de 25mm (ar(25)) e placa cimentícia de 100mm de espessura (PLC(10)), fixado em LL, LP e PP.

Tabela 6. Resultados obtidos da PT em painéis duplos com materiais diferentes, com absorvedor sonoro [7,8]

Configuração dos painéis	f_0 (Hz)	PT _A (dB)	f_{c1} (Hz)	f_{c2} (Hz)	Tipo de fixação dos painéis						f_i (Hz)	PT _D (dB)
					LL		LP		PP			
					PT _B (dB)	PT _C (dB)	PT _B (dB)	PT _C (dB)	PT _B (dB)	PT _C (dB)		
PLC(10)-LVI(50)-ar(25)-GEA(12,5)	125	21	3113	21158	77	60	86	69	81	64	733	67
	125	21	3114	21158	77	60	86	69	81	64	733	67
PLC(12)-LVI(50)-ar(40)-GEA(15)	105	21	2595	17631	76	59	83	66	79	62	611	67
	104	21	2595	17632	76	59	83	66	79	62	611	67
PMC(75)-LVI(50)-ar(25)-PLC(10)	84	36	274	21158	99	82	101	84	95	78	733	93
	83	36	274	21158	99	82	101	84	95	78	733	93
PMC(75)-LVI(50)-ar(25)-GEA(12,5)	99	37	274	3113	74	58	68	52	62	46	733	90
	98	37	274	3114	74	58	68	52	62	46	733	90
CCA(100)-LVI(50)-ar(25)-PLC(10)	91	27	390	21158	88	71	94	77	88	71	733	82
	90	27	390	21158	88	71	94	77	88	71	733	82
CCA(100)-LVI(50)-ar(25)-GEA(12,5)	105	28	390	3113	63	47	61	45	55	39	733	79
	104	28	390	3114	63	47	61	45	55	39	733	79
EPS(100)-LVI(50)-ar(25)-PLC(10)	86	31	12670	21158	94	77	98	81	92	75	733	87
	85	31	12670	21158	94	77	98	81	92	75	733	87
EPS(100)-LVI(50)-ar(25)-GEA(12,5)	101	33	3113	12670	82	65	77	60	82	65	733	85
	100	32	3114	12670	82	65	77	60	82	65	733	84

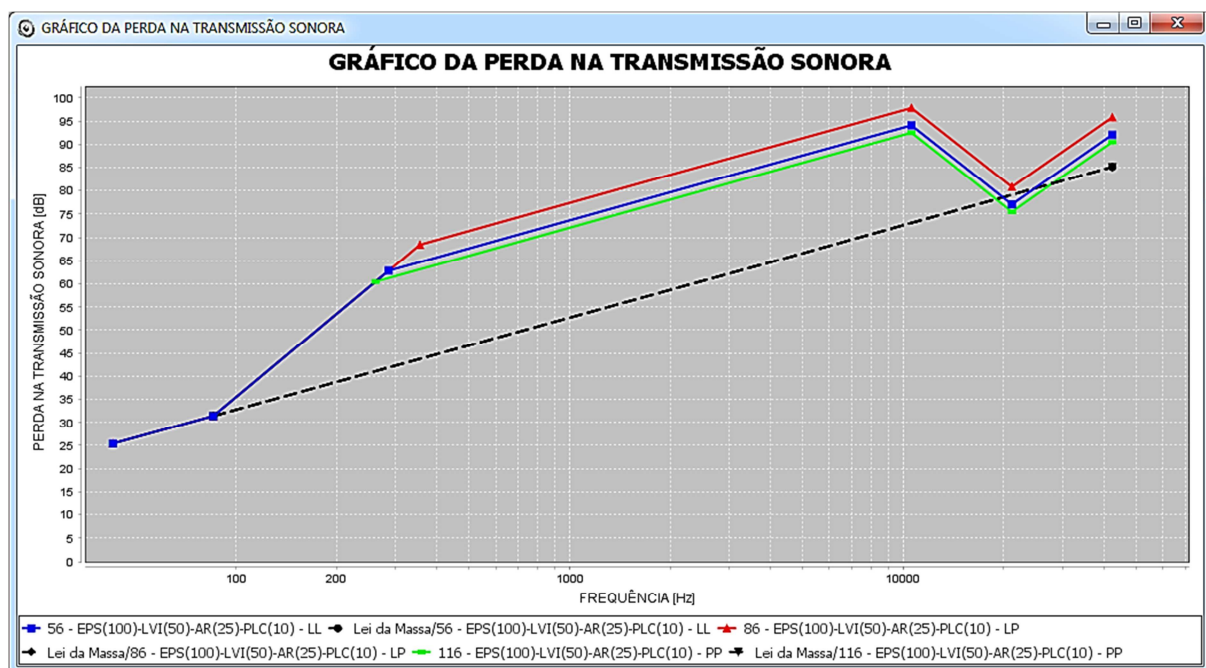


Figura 10. PT de painel duplo de materiais diferentes com absorvedor sonoro: EPS(100)-LVI(50)-ar(25)-PLC(10) - Fixado em LL, LP e PP [8]

15 Conclusão

A interface simples e intuitiva do modelo computacional desenvolvido para estimar a perda na transmissão sonora em painéis simples e em multicamadas, sem ou com material absorvedor de som na cavidade entre os painéis, possibilita a análise de resultados em forma de gráficos e em relatórios de dados, que podem ser transportados para planilhas e receberem tratamentos que facilitem a avaliação.

Os resultados obtidos por Fortes [8] são comparados aos resultados de Ribas [7], comprovando-se sua precisão, pois é observada uma diferença máxima de 1,5% nas configurações de fechamentos configurados adotadas na validação, que podem ser atribuídos a aproximações. Pode-se, portanto, constatar que esse software constitui uma ferramenta confiável na análise da perda na transmissão

sonora de painéis simples e em multicamadas, o que viabiliza sua utilização para uma rápida análise acústica de sistemas de fechamento industrializados.

Acknowledgements

Os autores agradecem a UFOP e a Capes.

References

- [1] U. C. SALES, H. A. SOUZA e F. A. NEVES. Caracterização da construção metálica nacional e avaliação acústica de painéis de fechamento pré-fabricados. In: IX Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, Paraná. *Anais...* ENTAC 2002.
- [2] T. C. PEREIRA, M. F. LANA, M. G. SILVA e V. G. SILVA. Alternativas de vedações externas de edifícios com estruturas metálicas. *Revista Engenharia Ciência e Tecnologia*, nº 17 (setembro/outubro), p.18-26, 2000.
- [3] D. A. BIES e C. H. HANSEN. *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. 3ª Ed. London and New York: Spon Press, 2003.
- [4] S. R. BISTAFA. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- [5] S. N. Y. GERGES. *Ruído, Fundamentos e Controle*. 2ª ed. Florianópolis: UFSC, 2000. 696p.
- [6] O. A. B. HASSAN. *Building Acoustics and Vibrations: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific, 2009.
- [7] R. A. J. RIBAS. *Método para Avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.
- [8] R. C. FORTES. *Modelo computacional com interface gráfica para análise de perda na transmissão sonora em painéis de fechamento simples e duplos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.