

## APLICAÇÃO INFORMÁTICA LIVRE PARA CÁLCULO SEGUNDO A EN 12354-6 DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM ESPAÇOS COM ABSORÇÃO SONORA IRREGULAR

PACS:

Vitor Rosão<sup>1</sup>; Eusébio Conceição<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SCHIU, Engenharia de Vibração e Ruído

Rua de Faro, Bloco B, 2.º Frente, Estoi

8005-463 Faro, Portugal

Tel.: 00351 289998009; Fax: 00351 289998318; email: [vitorrosao@schiu.com](mailto:vitorrosao@schiu.com)

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve

Campus de Gambelas

8005-139 Faro, Portugal

Tel.: 00351 289 800 100. Fax: 00351 289 800 072; e-mail: [econcei@ualg.pt](mailto:econcei@ualg.pt)

### RESUMO

Sendo usual a ocorrência de situações em que a absorção sonora dos compartimentos, em edifícios, não é regular, tipicamente com maior absorção sonora no tecto, assume especial relevância o uso do método explicitado no Anexo D da EN 12354-6, para previsão do Tempo de Reverberação, contudo trata-se de um método relativamente complexo que, por isso, ganha em ser automatizado. O presente artigo descreve e apresenta a aplicação informática livre desenvolvida para cálculo automático do Tempo de Reverberação de acordo com o método referido.

### 1 INTRODUÇÃO

Encontra-se generalizada a utilização da fórmula de Sabine [1], possivelmente devido à sua simplicidade, contudo a sua utilização, em casos onde a absorção sonora seja irregular, pode conduzir à previsão de valores de Tempo de Reverberação menores do que a realidade, o que pode constituir um grave problema, tanto quanto a legislação em vigor [2] estabelece que os valores do Tempo de Reverberação tem de ser inferiores a um determinado limite. Assume assim especial importância, nestes casos, a utilização de métodos previsionais em que os resultados se aproximem (ou superem, por razões de segurança) mais da realidade, como é o caso do método explicitado no Anexo D da Norma [3].

### 2 EN 12354-6

Em suma, a norma [3] estabelece forma de cálculo prospetivo do Tempo de Reverberação  $T_{rev}$ , distinguindo dois casos importantes:

1. Espaços, objetos e Absorção Sonora regular;
2. Absorção Sonora irregular.

### 2.1 EN 12354-6 – Absorção Sonora regular

De acordo com a equação (5) da norma [3] o Tempo de Reverberação, para casos de Absorção Sonora regular, é dado por:

$$T_{rev} = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c A_{eq}} [s] \quad (1)$$

Onde  $c$  é a velocidade do som no ar – assume-se normalmente  $c = 345,6$  m/s (por exemplo na norma [4]), o que faz com que  $55,3/c \approx 0,16$ , de onde resulta a conhecida fórmula de Sabine [1].

Na posse de informação sobre a temperatura e a humidade relativa do ar pode recorrer-se às seguintes equações, constantes na referência [5]:

$$c_{seco} = 331 + 0,6 T_{oC} [m/s] \quad (2)$$

$$c_{húmido} = [1+0,16H] \times c_{seco} [m/s] \quad (3)$$

Na equação (1)  $V$  é o volume em vazio do compartimento fechado em causa,  $\Psi$  é a fração volumétrica de objetos, e  $A_{eq}$  é a Área de Absorção Sonora Equivalente total.

A fração volumétrica de objetos,  $\Psi$ , é dada pela equação seguinte:

$$\Psi = \frac{\sum_{j=1}^o V_{obj,j} + \sum_{k=1}^p V_{obj,k}}{V} \quad (4)$$

onde  $V_{obj,j}$  é o volume de cada objeto  $j$  e  $V_{obj,k}$  é o volume de cada conjunto de objetos  $k$ .

A Área de Absorção Sonora Equivalente Total ( $A_{eq}$ ), do compartimento fechado em causa, é dada por:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} S_i + \sum_{j=1}^o A_{obj,j} + \sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} S_k + A_{air} [m^2] \quad (5)$$

Onde  $n$  é o número de superfícies  $i$ ,  $o$  é o número de objetos  $j$ ,  $p$  é o número de conjuntos de objetos  $k$ ,  $\alpha_{s,i}$  (valor em função da frequência) é o coeficiente de Absorção Sonora da superfície  $i$  (apresentam-se no

Quadro 1 os valores típicos indicados na norma [3]; para uma informação mais completa poderá ser consultada a referência [6]),  $S_i$  é a área da superfície  $i$ ,  $A_{obj,j}$  (valor em função da frequência) é a Área de Absorção Sonora Equivalente do objeto  $j$  (apresentam-se no Quadro 2 os valores típicos indicados na norma [3]),  $\alpha_{s,k}$  (valor em função da frequência) é o coeficiente de Absorção Sonora do conjunto de objetos  $k$  (apresentam-se no Quadro 3 os valores típicos indicados na norma [3]),  $S_k$  é a área da superfície ocupada pelo conjunto de objetos  $k$ , e  $A_{air}$  é a Área de Absorção Sonora Equivalente do ar.

A Área de Absorção Sonora Equivalente do ar é dada por:

$$A_{air} = 4m_p V(1 - \Psi) [m^2] \quad (6)$$

Onde  $V$  é o volume em vazio do compartimento fechado em causa,  $m_p$  (valor em função da frequência) o Coeficiente de Atenuação da Potência, com valores tabelados no Quadro 4 em função da humidade e da temperatura, e  $\Psi$  é a fração volumétrica de objetos.

Para objetos duros com forma irregular, tipo máquinas, armários e móveis de escritório, a Área de Absorção Sonora Equivalente, se não disponível, pode ser estimada através do seu volume da seguinte forma:

$$A_{obj} = V_{obj}^{\frac{2}{3}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (7)$$

Onde  $V_{obj}$  é o volume do objeto duro em causa.

**Quadro 1: Coeficientes típicos de Absorção Sonora de materiais [3]**

Materiais	Coeficiente de absorção sonora $\alpha$ em Bandas de oitava, frequência central em Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
betão, tijolo rebocado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
alvenaria, sem reboco	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
revestimentos rígidos de pavimentos (ex. PVC) em pisos pesados	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
revestimentos pouco rígidos de pavimentos em pisos pesados; $\leq 5$ mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,30	0,40
revestimentos pouco rígidos de pavimentos em pisos pesados; $\geq 10$ mm	0,04	0,08	0,15	0,30	0,45	0,55
pavimento de madeira	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
janelas, fachada de vidro	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
portas (madeira)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
cortinas (0 mm - 200 mm) em frente a superfície rija*	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
cortina $< 0,2$ kg/m <sup>2</sup> ; 0 mm - 200 mm em frente a superfície rija; mínimo típico*	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
cortina de tecido $< 0,4$ kg/m <sup>2</sup> ; dobras $> 1:3$ , 0-200 mm em frente a superfície rija; máximo típico	0,10	0,40	0,70	0,90	0,95	1,00
grandes aberturas (dimensão mais pequena $> 1$ m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
grelha de ar, 50% área exposta	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Nota: Estes dados são baseados em publicações usadas na Áustria, Dinamarca e Holanda.

\* Em frente a uma janela os valores combinados podem aumentar para valores próximos duma janela isolada.

**Quadro 2: Valores típicos de Área de Absorção Sonora Equivalente – objetos [3]**

Objeto	Área de absorção equivalente $A_{obj}$ em Bandas de oitava, frequência central em Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
cadeira, madeira	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
cadeira, estofada	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
1 pessoa num grupo, sentada ou em pé, 1 por 6m <sup>2</sup> de área, mínimo típico	0,05	0,10	0,20	0,35	0,50	0,65
1 pessoa num grupo, sentada, 1 por 6m <sup>2</sup> de área, máximo típico	0,12	0,45	0,80	0,90	0,95	1,00
1 pessoa num grupo, de pé, 1 por 6m <sup>2</sup> de área, máximo típico	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40

Nota: Estes dados são baseados em publicações usadas na Áustria, Dinamarca e Holanda.

**Quadro 3: Valores típicos de coeficientes de Absorção Sonora – conjuntos de objetos [3]**

Conjunto de objeto	Área de absorção equivalente $A_{obj}$ em Bandas de oitava, frequência central em Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
cadeiras em fila de 0,9m - 1,2m; madeira/plástico	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
cadeiras em fila de 0,9m - 1,2m; estofadas; típico mínimo	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
cadeiras em fila de 0,9m - 1,2m; estofadas; típico máximo	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00	1,00
pessoas sentadas em fila de 0,9m - 1,2m (audiência); típico mínimo	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,70
pessoas sentadas em fila de 0,9m - 1,2m (audiência); típico máximo	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90
crianças numa sala de aula mobilada, 1 por m <sup>2</sup> de área	0,10	0,20	0,25	0,35	0,40	0,40

Nota: Estes dados são baseados em publicações usadas na Áustria, Dinamarca e Holanda.

**Quadro 4: Coeficiente de Atenuação da Potência m no ar (EN 12354-6)**

	$m_p$ [ $10^{-3}$ Neper/m, por Banda de oitava]						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz
10°C, 30%-50% Humidade	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10°C, 50%-70% Humidade	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10°C, 70%-90% Humidade	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20°C, 30%-50% Humidade	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20°C, 50%-70% Humidade	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20°C, 70%-90% Humidade	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

Nota: Estes valores são deduzidos das tabelas dos coeficientes de atenuação atmosférica em decibel por km constantes na norma [7], em Banda de 1/3 de oitava, dividindo esses valores por 4,343 [10log(e)]. Os valores para as Bandas de oitava são os valores da Banda central até 1kHz e os valores da menor Banda de 1/3 de oitava acima de 1kHz. Os valores apresentados aqui correspondem à média linear para a gama de humidades relativas apresentadas.

De notar que a equação (1) é válida apenas para os seguintes casos:

- Volumes regulares: nenhuma dimensão poderá ser mais de 5 vezes maior do que outra;
- Distribuição regular da Absorção Sonora: os coeficientes de absorção sonora não podem variar mais de um fator de 3 entre pares de superfícies opostas, a menos que existam objetos dispersores;
- Baixa fração volumétrica de objetos:  $\Psi < 0,2$ .

## 2.2 EN 12354-6 – Absorção Sonora irregular

Uma vez que são muito comuns os casos de Absorção Sonora irregular, dado que a maioria das vezes aplicam-se materiais absorventes apenas no teto, a norma [3] estabelece um método, no ponto D.2 do seu Anexo D, para estimativa do Tempo de Reverberação nestes casos.

Assume-se a seguinte (ver Figura 1) forma regular com volume  $V = L \times B \times H \text{ m}^3$ .

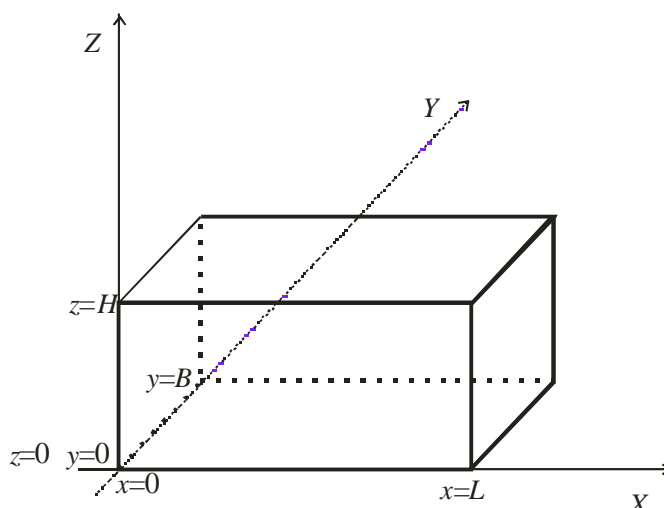


Figura 1: Dimensões do compartimento retangular regular segundo a norma [3]

Para as altas frequências o campo sonoro é dividido em 1 parte, associada ao campo difuso, e em mais 3 partes, incidindo nas superfícies perpendiculares aos eixos dos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Para cada um desses 4 campos é determinada a Absorção Sonora Equivalente Efetiva e o respetivo Tempo de Reverberação.

A importância de cada um dos campos sonoros é determinada pelo número de Modos Próprios associados, deduzidos através das dimensões do compartimento. Para as baixas frequências assume-se uma redução da Absorção Sonora Equivalente no campo sonoro total devido à perda de difusão nessas frequências.

A transição entre as altas e as baixas frequências é determinada comparando a frequência central das Bandas de oitava com a Frequência de Transição  $f_t$  dada por:

$$f_t = \frac{8,7 \cdot c}{v^{1/3}} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

O Número de Modos Próprios, para cada Campo Incidente, é dado pelas seguintes equações:

$$N_x = 0,14 + 1,43 \left[ \frac{(B+H)}{2c} + \frac{\pi f}{c^2} BH \right] \frac{c^3}{4\pi f^2 V} \quad (9)$$

$$N_y = 0,14 + 1,43 \left[ \frac{(L+H)}{2c} + \frac{\pi f}{c^2} LH \right] \frac{c^3}{4\pi f^2 V} \quad (10)$$

$$N_z = 0,14 + 1,43 \left[ \frac{(L+B)}{2c} + \frac{\pi f}{c^2} LB \right] \frac{c^3}{4\pi f^2 V} \quad (11)$$

A Área de Absorção Sonora Equivalente para os campos sonoros incidentes  $A_x$ ,  $A_y$  e  $A_z$ , e a Área de Absorção Sonora Equivalente para o campo difuso  $A_d$ , são dadas por:

$$A_x = \frac{c^2}{2f^2 L^2} (A_{x=0} + A_{x=L}) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + [A_{y=0} + A_{y=B} + A_{z=0} + A_{z=H}] \sqrt{2} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + \pi mV \quad (12)$$

$$A_y = \frac{c^2}{2f^2 B^2} (A_{y=0} + A_{y=B}) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + [A_{x=0} + A_{x=L} + A_{z=0} + A_{z=H}] \sqrt{2} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + \pi mV \quad (13)$$

$$A_z = \frac{c^2}{2f^2 H^2} (A_{z=0} + A_{z=H}) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + [A_{x=0} + A_{x=L} + A_{y=0} + A_{y=B}] \sqrt{2} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1/3} + \pi mV \quad (14)$$

$$A_d = (A_{x=0} + A_{x=L} + A_{y=0} + A_{y=B} + A_{z=0} + A_{z=H}) + 4mV \quad (15)$$

Onde, por exemplo,  $A_{x=0}$  e  $A_{x=L}$ , correspondem, respetivamente, à Área de Absorção Sonora da superfície  $x = 0$  e da superfície  $x = L$  (os índices  $y$  e  $z$  indicam as mesmas quantidades associadas, respetivamente, às superfícies perpendiculares ao eixo dos  $y$  e dos  $z$ ).

A frequência de referência é  $f_0 = 1000$  Hz.

Os diferentes Campos Sonoros possuem ainda a contribuição dos efeitos de dispersão das diferentes superfícies e os efeitos de dispersão e absorção dos objetos. Isso é expresso na Área de Absorção Sonora de dispersão,  $A'_x$ ,  $A'_y$ ,  $A'_z$  e  $A'_d$ :

$$A'_x = [LH(\delta_{y=0} + \delta_{y=B}) + LB(\delta_{z=0} + \delta_{z=H})] + A_{obj,y} + A_{obj,z} + A_{obj,central} \quad (16)$$

$$A'_y = [BH(\delta_{x=0} + \delta_{x=L}) + LB(\delta_{z=0} + \delta_{z=H})] + A_{obj,x} + A_{obj,z} + A_{obj,central} \quad (17)$$

$$A'_z = [BH(\delta_{x=0} + \delta_{x=L}) + LH(\delta_{y=0} + \delta_{y=B})] + A_{obj,x} + A_{obj,y} + A_{obj,central} \quad (18)$$

$$A'_d = \sum_{Tudo} A_{obj} + N_x A'_x + N_y A'_y + N_z A'_z \quad (19)$$

Onde, por exemplo,  $\delta_{x=0}$  e  $\delta_{x=L}$ , correspondem aos Coeficientes de Dispersão Sonora da superfície  $x = 0$  e da superfície  $x = L$  (os índices  $y$  e  $z$  indicam as mesmas quantidades associadas, respetivamente, às superfícies perpendiculares ao eixo dos  $y$  e dos  $z$ ).

Relativamente aos Coeficientes de Dispersão Sonora  $\delta$ , na ausência de informação específica a norma [3] recomenda:

- Para superfícies planas rígidas:  $\delta \leq 0,05$ .
- Superfícies com recessos, nas médias e altas frequências, tipicamente:  $0,4 \leq \delta \leq 0,6$ .

$A_{obj}$  é a Área de Absorção Sonora Equivalente dos objetos, em  $m^2$ , e  $A_{obj,x}$ ,  $A_{obj,y}$ ,  $A_{obj,z}$  e  $A_{obj,central}$  são, respetivamente, as Área de Absorção Sonora Equivalente, em  $m^2$ , dos objetos associados às superfícies perpendiculares aos eixos dos  $x$  ( $x = 0$  e  $x = L$ ), dos  $y$  ( $y = 0$  e  $y = B$ ), e dos  $z$  ( $z = 0$  e  $z = H$ ) e dos objetos centrais.

A Área de Absorção Sonora Equivalente efetiva  $A^*$ , para cada campo sonoro, é determinada da seguinte forma:

$$A_d^* = \frac{A_d + A_d' - \frac{N_x A_x'^2}{A_x + A_x'} - \frac{N_y A_y'^2}{A_y + A_y'} - \frac{N_z A_z'^2}{A_z + A_z'}}{1 + \frac{N_x A_x'}{A_x + A_x'} + \frac{N_y A_y'}{A_y + A_y'} + \frac{N_z A_z'}{A_z + A_z'}} \quad (20)$$

$$A_x^* = \frac{A_x + A_x'}{1 + \frac{A_x'}{A_d^*}} \quad (21)$$

$$A_y^* = \frac{A_y + A_y'}{1 + \frac{A_y'}{A_d^*}} \quad (22)$$

$$A_z^* = \frac{A_z + A_z'}{1 + \frac{A_z'}{A_d^*}} \quad (23)$$

A Área de Absorção Sonora Equivalente efetiva para o campo total  $A_{xyzd}^*$ , para as baixas frequências ( $f < f_i$ ), é dada por:

$$A_{xyzd}^* = (\overline{A_{x=0}} + \overline{A_{x=L}} + \overline{A_{y=0}} + \overline{A_{y=B}} + \overline{A_{z=0}} + \overline{A_{z=H}}) + \sum A_{obj} + 4mV \quad (24)$$

Onde:

$$\overline{A} = A_{eq} e^{-\frac{A_{eq}}{S}} \quad (25)$$

Sendo  $A_{eq}$  e  $S$ , respetivamente, a Área de Absorção Sonora Equivalente e a área superfície em causa.

O Tempo de Reverberação para cada campo sonoro, para as altas frequências ( $f > f_i$ ), vem:

$$T_x = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c \frac{A_x^*}{A_x}} \quad (26)$$

$$T_y = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c \frac{A_y^*}{A_y}} \quad (27)$$

$$T_z = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c_0 \frac{A_z^*}{A_z}} \quad (28)$$

$$T_d = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c \frac{A_d^*}{A_d}} \quad (29)$$

Se a diferença entre os 4 Tempos de Reverberação anteriores for pequena, o  $T_d$  pode ser considerado como a estimativa mais adequada do Tempo de Reverberação para as Altas Frequências ( $f > f_i$ ).

Se a diferença entre os 4 Tempos de Reverberação anteriores não for pequena, o Tempo de Reverberação é provavelmente maior do que  $T_d$  e a estimativa mais adequada do Tempo de Reverberação ( $T_{20}$ ), para as Altas Frequências ( $f > f_i$ ), passa a ser (de notar que se o valor for menor do que  $T_d$  é o valor de  $T_d$  que deve ser considerado):

$$T_{Estimativa} = \frac{(T_x + T_y + T_z + T_d)}{4} \geq T_d \quad (30)$$

Para as Baixas Frequências ( $f < f_i$ ) a estimativa mais adequada do Tempo de Reverberação ( $T_{20}$ ) é:

$$T_{EstimativaBF} = \frac{55,3 V(1-\Psi)}{c A_{xyzd}^*} \quad (31)$$

### 2.3 Comparação das previsões do Tempo de Reverberação

Apresentam-se no Quadro 5 os resultados obtidos para alguns exemplos de espaços regulares, vazios (sem objetos;  $\Psi = 0$ ), assumindo em todos os casos não existir dispersão ( $\delta = 0$ ) e uma temperatura de 20°C e uma Humidade relativa de 60%. Para o cálculo do  $T_{rev,Regular}$  considera-se a equação (1), e para o cálculo de  $T_{rev,Irregular}$  as equações (30) e (31).

Apresenta-se conjuntamente o valor limite legal mais comum ( $T_{rev} \leq 0,15V^{1/3}$ ; [2]) para cada caso.

A análise do Quadro 5 permite verificar que aumentando a Absorção Sonora de uma só superfície, no exemplo o tecto, a utilização da equação (1) ( $T_{rev,Regular}$ ), conduz a Tempos de Reverberação significativamente mais reduzidos do que os calculados, de forma mais correta (ou pelo menos mais conservativa) para estes casos, pelas equações (30) e (31) ( $T_{rev,Irregular}$ ), o que, conforme referido na Introdução desta comunicação, poderá fazer com que se conclua erradamente, com o uso da equação (1), ou similar (fórmula de Sabine), ser suficiente um determinado valor de Absorção Sonora no tecto para cumprir o limite legal, e na realidade será necessário um valor superior de Absorção Sonora no tecto e/ou aumentar a Absorção Sonora em outras superfícies (nos exemplos do  $T_{rev,Irregular}$  do Quadro 5 em nenhum caso é suficiente aumentar para 0,9 o Coeficiente de Absorção Sonora de todo o tecto para cumprir o limite legal).

**Quadro 5: Tempo de Reverberação previsto para Absorção Sonora regular e irregular**

L [m]	B [m]	H [m]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$T_{rev,Regular}$ [s]	$T_{rev,Irregular}$ [s]				Limite [s]
						0,5 kHz	1 kHz	2 kHz	Média	
3	3	3	0,01	0,01	8	6,6	6,2	5,5	6,1	0,5
3	3	3	0,01	0,3	1,4	1,6	1,6	1,9	1,7	0,5
3	3	3	0,01	0,5	0,9	1,2	1,2	1,7	1,4	0,5
3	3	3	0,01	0,7	0,6	1,1	1,1	1,5	1,2	0,5
3	3	3	0,01	0,9	0,5	1,0	1,0	1,5	1,2	0,5
5	5	3	0,01	0,01	10,9	8,7	8,5	6,9	8,0	0,6
5	5	3	0,01	0,3	1,4	1,7	3,2	2,5	2,5	0,6
5	5	3	0,01	0,5	0,9	1,3	2,8	2,3	2,1	0,6
5	5	3	0,01	0,7	0,7	1,1	2,6	2,1	2,0	0,6
5	5	3	0,01	0,9	0,5	1,1	2,5	2,1	1,9	0,6
4	9	3	0,01	0,01	11,5	9,1	9,0	7,1	8,4	0,7
4	9	3	0,01	0,3	1,4	1,7	3,4	2,7	2,6	0,7
4	9	3	0,01	0,5	0,9	1,3	3,0	2,4	2,2	0,7
4	9	3	0,01	0,7	0,7	1,1	2,8	2,3	2,1	0,7
4	9	3	0,01	0,9	0,5	1,1	2,6	2,2	2,0	0,7
6	10	3	0,01	0,01	13,3	10,3	10,2	7,8	9,5	0,8
6	10	3	0,01	0,3	1,5	1,7	4,0	3,1	3,0	0,8
6	10	3	0,01	0,5	0,9	1,3	3,6	2,8	2,6	0,8
6	10	3	0,01	0,7	0,7	1,2	3,3	2,7	2,4	0,8
6	10	3	0,01	0,9	0,5	1,1	3,1	2,6	2,3	0,8

$\alpha_1$ : Coeficiente de Absorção Sonora das paredes e chão;  $\alpha_2$ : Coeficiente de Absorção Sonora do tecto.

Salienta-se que, de acordo com algumas referências, por exemplo [8-10], as previsões através do método do Anexo D da norma [3], podem a ser significativamente conservativas.



### 3 APLICAÇÃO INFORMÁTICA

Apresenta-se na Figura 2 a janela de introdução de dados da aplicação informática desenvolvida para a previsão do Tempo de Reverberação. Salienta-se que se considera, por simplicidade, a ausência de objetos (espaços vazios;  $\Psi = 0$ ), uma Humidade Relativa de 60% e uma Temperatura de 20°C. Salienta-se também que no cálculo do Tempo de Reverberação para Absorção Sonora regular, é tido em conta a Área de Absorção Sonora Equivalente do ar ( $A_{air}$ ), o que não é normalmente tido em conta na fórmula clássica de Sabine [1].

**Figura 2: Janela de entrada da aplicação informática de previsão do Tempo de Reverberação**

<b>Divisão</b>															
Descrição: [?]	<input type="text"/>														
Comprimento (L)*: [?]	<input type="text"/>														
Largura (B)*: [?]	<input type="text"/>														
Altura (H)*: [?]	<input type="text"/>														
Volume da divisão vazia:	<input type="text"/>														
Temperatura:	20														
Humidade:	0.6														
<b>Parede 1</b>															
Área*:	<input type="text"/>														
Eixo*:	x														
Face:	X = 0														
Coefficiente de Absorção Sonora*: [?] >>	<table border="1"> <tr> <td>125Hz</td><td>250Hz</td><td>500Hz</td><td>1000Hz</td><td>2000Hz</td><td>4000Hz</td><td>8000Hz</td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td> </tr> </table>	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz									
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>									
Coefficiente de Dispersão Sonora*: [?] >>	<table border="1"> <tr> <td>125Hz</td><td>250Hz</td><td>500Hz</td><td>1000Hz</td><td>2000Hz</td><td>4000Hz</td><td>8000Hz</td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td> </tr> </table>	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz									
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>									

A Aplicação Informática desenvolvida está disponível no seguinte endereço: <http://doutoramento.schiu.com/software/ruído-ambiente-interior/tempo-reverberacao/>

Nesse mesmo endereço estão disponíveis as informações atualizadas sobre os desenvolvimentos associados a esta Aplicação Informática e às suas aplicações.

### 4 CONCLUSÕES

Espera-se que a Aplicação Informática desenvolvida, de acesso livre, possa contribuir para previsões de Tempo de Reverberação não subvalorizados – no caso de absorções sonoras não regulares - e subsequentemente para conclusões mais rigorosas sobre o cumprimento ou incumprimento dos requisitos acústicos legais [2] associados em vigor.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao QREN, ELECTROLAGOS, CLEARWINDS e ao Sr. Manuel Pereira.

### REFERÊNCIAS

[1] Martins da Silva, Pedro – *Acústica de Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 8.ª Ed. 2004. ISBN 972-49-0013-4.

[2] Diário da República Portuguesa – Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho. *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*.



- [3] European Standard, EN 12354-5 – *Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 6: Sound absorption in enclosed spaces*. 2003.
- [4] Norma Portuguesa, NP EN ISO 140-4 – *Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 4: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos*. 2009. (ISO 140-4: 1998)
- [5] Pierce, Allan D. – *Acoustics. An introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America, 1989. ISBN 0-88318-612-8.
- [6] Domingues, Odete – *A Acústica nos Edifícios: Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [7] Norma Portuguesa, NP 4361-1 – *Acústica: Atenuação do som na sua propagação ao ar livre: Parte 1: Cálculo da absorção atmosférica*. 1997. (ISO 9613-1: 1993).
- [8] Prodi, Nicola; Visenti, Chiara; Farnetani, Andrea – *How absorption and scattering affect reverberation time: studies on a scale model of a classroom*. Lisboa, Internoise 2010.
- [9] Kylliäinen, Mikko; Nilsson, Erling; Chigot, Pierre – *Effectiveness of EN 12354-6 and other calculation methods of room acoustics in ensuring required acoustic conditions in typical enclosed spaces*. Tampere, Finland, Euronoise 2006.
- [10] Kang, Jian; Neubauer, Reinhard O. – *Prediction Reverberation Time: Comparison between Analytic Formulae and Computer Simulation*. Roma, ICA 2011.