

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE ESTAÇÕES SUBTERRÂNEAS DO METRO DO PORTO, PORTUGAL

PACS: 43.55

Carvalho, António P. O.; Costa, Jorge D. N.
Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia, U. Porto
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto
Portugal
Tel: +351 225081931
Fax: +351 225081940
E-Mail: carvalho@fe.up.pt; ec12010@fe.up.pt

Palavras-chave: Acústica, Ruído de Fundo, *RASTI*, Tempo de Reverberação, Metro

ABSTRACT

The purpose of this study is the acoustic characterization of underground metro stations, taking as a case study the *Metro do Porto* (Portugal). The acoustic parameters measured *in situ* were: L_{Aeq} (ambient noise), *RASTI* and Reverberation Time, for three underground stations (*Salgueiros*, *Faria Guimarães* and *Heroísmo*). The results show that the station with the best acoustic behavior is *Salgueiros* ($RT_{avg} = 3.2$ s, $RASTI_{avg} = 0.55$) which is concluded to be connected to the different amount of acoustic treatment applied in the stations' ceilings.

RESUMO

O objectivo desta comunicação é a caracterização acústica de estações de metro subterrâneas tendo como caso de estudo o *Metro do Porto* (Portugal). Foram medidos os parâmetros acústicos: L_{Aeq} (ruído ambiente), *RASTI* e Tempo de Reverberação, para três estações (*Faria Guimarães*, *Heroísmo* e *Salgueiros*). Os resultados obtidos mostram que a estação com melhor comportamento acústico é a de *Salgueiros* ($TR = 3,2$ s, $RASTI = 0,55$) facto que se conclui estar ligado às diferentes áreas de tratamento acústico aplicadas nas estações.

1. METODOLOGIA

O objectivo deste estudo é a caracterização acústica de estações de metro subterrâneas tendo como caso de estudo o *Metro do Porto*. Foram aí efectuadas medições *in situ* de parâmetros acústicos (Ruído de Fundo, *RASTI* e Tempo de Reverberação) e em três estações (*Faria Guimarães*, *Heroísmo* e *Salgueiros*). A análise dos resultados permitem tirar conclusões sobre o seu comportamento acústico [1].

Para o Ruído de Fundo foram feitas três medições de L_{Aeq} em dois pontos distintos (Fig. 1). No ponto 1 (junto à linha, *com* e *sem* passagem de comboio) e no ponto 2 (junto ao acesso à plataforma, *sem* passagem de comboio). O *RASTI* foi medido em quatro pares de pontos dispostos ao longo das estações (Fig. 2). O *TR* foi medido oito vezes em cada estação (Fig. 3),

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

em quatro pontos distintos com o sonómetro orientado em duas direcções em cada ponto. Estas metodologias de medição foram semelhantes para as três estações.

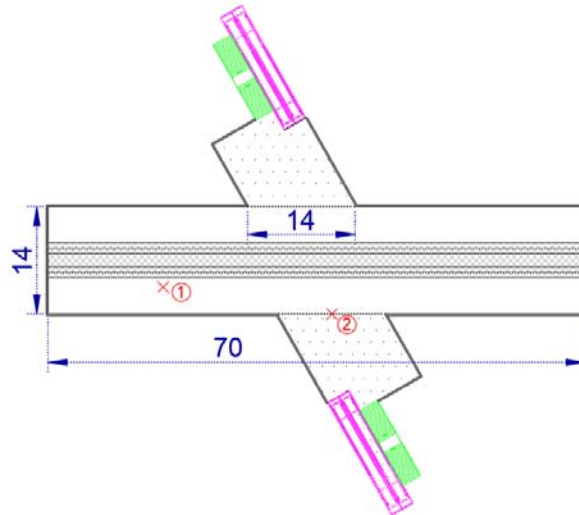


Fig. 1 - Plataforma da estação *Faria Guimarães* com os pontos da medição do ruído de fundo (em m)

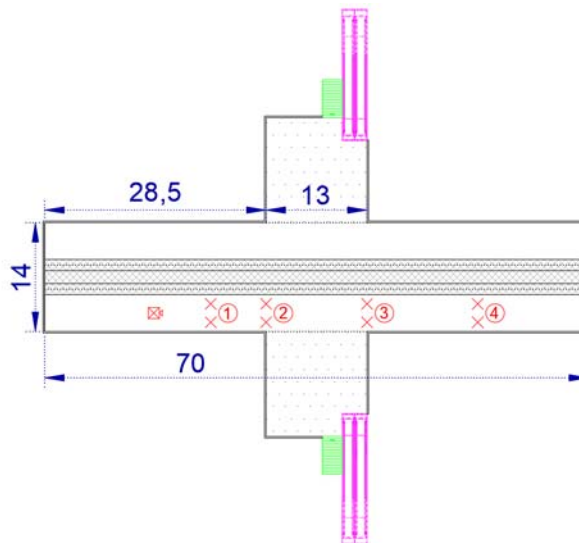


Fig. 2 - Plataforma da estação *Heroísmo* com os quatro pontos da medição do RASTI (em m)

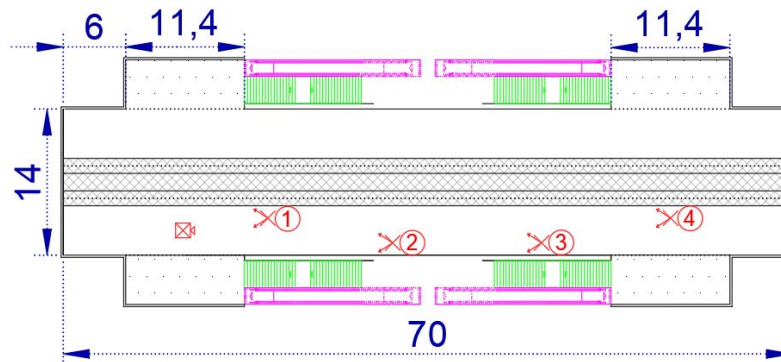


Fig. 3 - Plataforma da estação *Salgueiros* com os quatro pontos da medição do *TR* (em m)

2. RESULTADOS

O ruído de fundo nas estações em estudo tem duas fontes predominantes: a passagem dos comboios e o funcionamento das escadas rolantes. Para todas as medições que incluem um veículo a passar, os níveis sonoros equivalentes são bastante superiores àqueles das medições sem passagem de veículos. Também para as medições efectuadas mais próximo das escadas rolantes, e apesar de estas terem um funcionamento intermitente, os valores dos L_{Aeq} são superiores aos valores das medições no ponto 1 (junto à linha e sem comboio) [1].

Fazendo a comparação dos níveis sonoros equivalentes entre as estações em estudo para cada ponto de medição (Fig. 4) conclui-se que:

- Para o ponto 1 *sem comboio*, o valor mais baixo é o da estação *Faria Guimarães* com 48 dB(A), seguido da estação *Salgueiros* com 53 dB(A) e da estação *Heroísmo* com 57 dB(A).
- Para o ponto 1 *com comboio*, o valor mais baixo é o de *Salgueiros* com 71 dB(A), seguido de *Faria Guimarães* com 77 dB(A) e de *Heroísmo* com 84 dB(A). Nesta medição o valor mais baixo passou a ser o da estação *Salgueiros*.
- No ponto 2 *sem comboio*, o valor mais baixo do L_{Aeq} foi em *Salgueiros* com 56 dB(A), seguido de *Faria Guimarães* com 58 dB(A) e o mais elevado foi o da estação *Heroísmo* com 62 dB(A).

Para todos os pontos a estação mais ruidosa foi a do *Heroísmo*, sensação que foi notória nas visitas ao local. Os valores do L_{Aeq} são superiores em 13 dB ao ruído da estação de *Salgueiros* aquando da passagem do comboio e 6 dB junto à zona de acesso à plataforma de embarque. O ruído sentido nesta estação é devido principalmente ao funcionamento das escadas rolantes e ao escoamento de água em tubagens por baixo da linha. A existência de água em circulação tem origem no sistema de drenagem e bombagem necessário para retirar o excesso de água da envolvente da estação.

A estação de *Salgueiros* é a que tem menores valores do ruído de fundo. Em reunião com o *Metro do Porto* foi mencionado que estas foram alvo de intervenções acústicas, no entanto as áreas tratadas foram diferentes para cada estação sendo de prever que tenha sido tratada na estação de *Salgueiros* uma área superior à tratada nas outras duas estações. Algo também aí referido foram os serviços de manutenção de equipamento, notando-se diferentes estados de funcionamento dos mecanismos da escada rolante e por conseguinte diferente nível de ruído nas três estações.

A evolução dos valores de *RASTI*, está representada na Fig. 5 onde estão apresentadas para as três estações, as médias dos valores medidos para cada par de pontos. A estação com os valores mais baixos do *RASTI* é a do *Heroísmo*, com valores de 0,21 a 0,45 para os pontos 4 a 1. Os valores mais baixos qualificam a inteligibilidade como *Má* e os seguintes como *Pobre*. Esta estação é também a que possui mais elevado ruído de fundo, facto que contribui para a má inteligibilidade. A estação *Faria Guimarães* é a seguinte na ordem crescente de inteligibilidade, com valores do *RASTI* de 0,28 a 0,49. Apesar de ter valores superiores à

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

estação do *Heroísmo*, os valores medidos nesta estação são também muito baixos, sendo que apenas no ponto 1 a inteligibilidade está na categoria do *Aceitável*, para os pontos 2 e 3 a inteligibilidade é *Pobre* e para o ponto 4 é *Má*. Os melhores valores para o *RASTI* foram medidos na estação de *Salgueiros*, com 0,49 a 0,64 para os quatro pontos. Nesta estação três dos valores são considerados *Aceitáveis* e o mais valor mais alto *Bom*.

A estação *Salgueiros* é a que apresenta menor decréscimo do ponto 1 para o 4, o que poderá ter origem na diferente disposição das entradas à plataforma de embarque. Nesta estação, existem duas entradas nas extremidades da plataforma, enquanto que para as outras duas estações existe apenas uma entrada, mas situada a meio da plataforma. Uma vez que as medições do *RASTI* foram efectuadas numa zona mais central da plataforma, a zona de acesso às escadas poderá ter tido mais influência no decréscimo dos valores do *RASTI* com a distância à fonte para as estações de *Faria Guimarães* e *Heroísmo* do que para a estação de *Salgueiros*. O facto da estação de *Salgueiros* ter um ruído de fundo menos intenso que as outras, também contribui para esta ter uma inteligibilidade melhor.

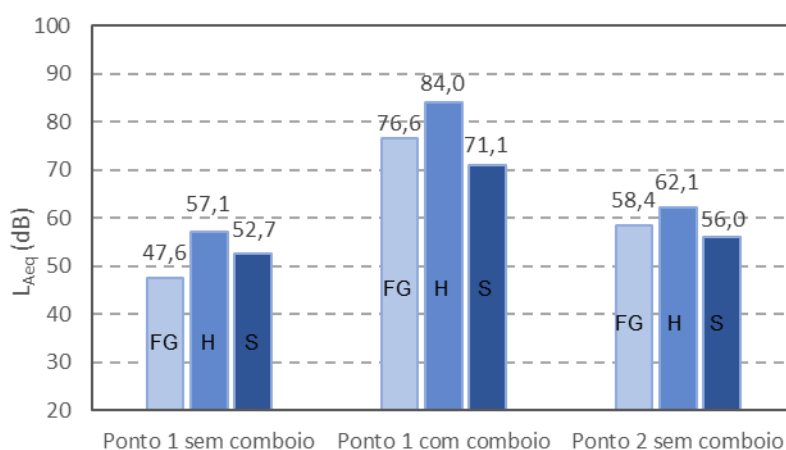


Fig. 4 - Valores do L_{Aeq} para cada estação agrupados por ponto de medição (FG - *Faria Guimarães*, H - *Heroísmo*, S - *Salgueiros*)

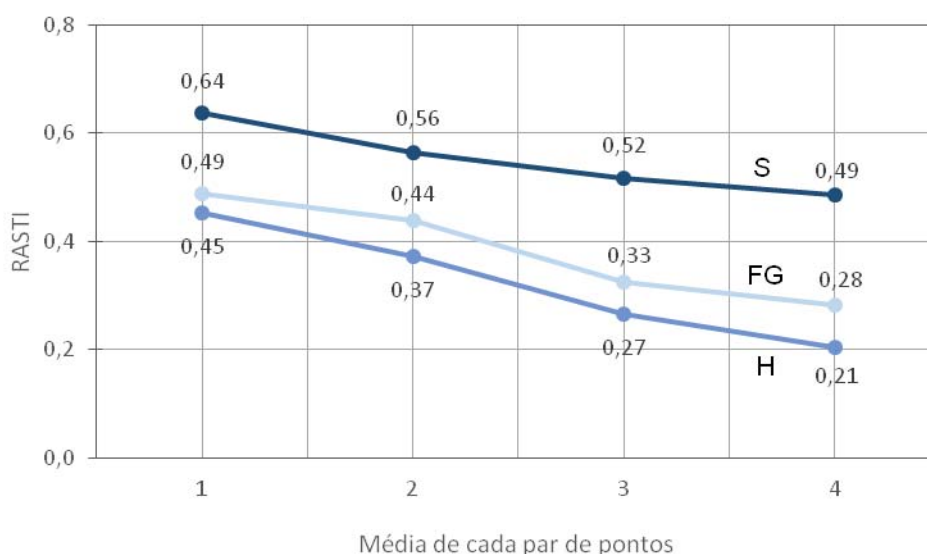


Fig. 5 - Média dos valores de *RASTI* de cada par de pontos (junto à linha e junto à parede) para as estações (FG - *Faria Guimarães*, H - *Heroísmo*, S - *Salgueiros*)

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Utilizando os valores de todas as medições foi calculada uma média geral do *RASTI* para cada estação (Fig. 6). Apesar deste valor ser uma combinação de medições em posições distintas, ao ter sido obtido da mesma forma para as três estações funciona como bom indicador para comparar o comportamento a nível da inteligibilidade das estações. Tem-se, com o valor mais baixo, a estação do *Heroísmo* (0,32), seguida por *Faria Guimarães* (0,38) e por fim *Salgueiros* (0,55) com uma média geral consideravelmente superior às outras.

A evolução dos valores do *TR* com a frequência pode ser observada na Fig. 7 onde se pode notar um desenvolvimento semelhante para as três estações. Para as bandas de 100 e 125 Hz o valor do *TR* é alto e tem de seguida um decréscimo até perto dos 400 Hz. Para as frequências médias o valor do *TR* sobe ligeiramente e começa novamente a decrescer com a entrada nas altas frequências.

Na Fig. 8 estão representados os *TR* médios (400-2,5k Hz, cf. legislação Portuguesa) de cada estação, sendo que a que tem um menor *TR* é a de *Salgueiros* com 3,6 s. Segue-se *Faria Guimarães* com 4,9 s e a que tem *TR* mais alto é *Heroísmo* com 5,7 s. À semelhança do *RASTI* a estação com o valor mais favorável é a de *Salgueiros*, com uma diferença de 1,6 s de *Faria Guimarães* e de 2,4 s para o *Heroísmo*.

Confirma-se a relação entre o *TR* e o *RASTI*, as estações com menor *TR* são também as que possuem um *RASTI* mais elevado.

No Quadro 1 estão representados os valores do L_{Aeq} para o ponto 1 com a passagem de comboio, as médias gerais do *RASTI* e os valores do *TR* (400-2,5k Hz) para as estações. De notar a coerência entre os parâmetros, sendo a estação menos ruidosa (*Salgueiros*) aquela com menor *TR* e melhor inteligibilidade, e a estação mais ruidosa (*Heroísmo*) aquela com maior *TR* e pior inteligibilidade. Os valores do *RASTI* estão em ordem crescente e os de *TR* e L_{Aeq} em ordem decrescente, pois quanto maior o *TR* e o Ruído de Fundo, pior são os valores do *RASTI*.

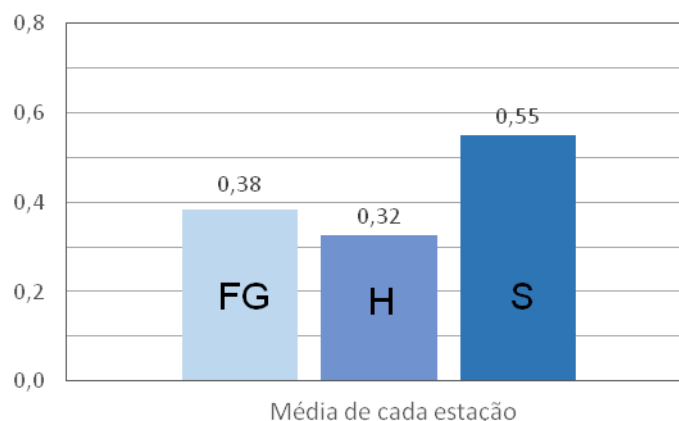


Fig. 6 - Média geral para cada estação (8 posições) das medições do *RASTI* (FG - *Faria Guimarães*, H - *Heroísmo*, S - *Salgueiros*)

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

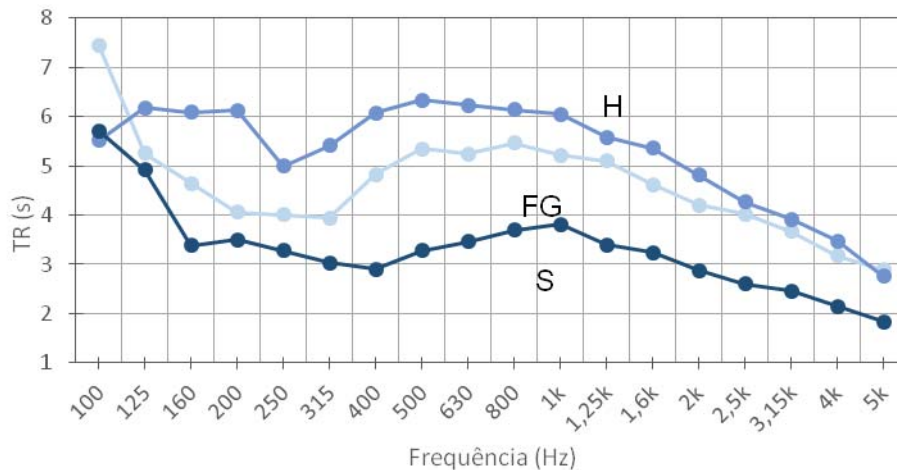


Fig. 7 – Média dos valores do *TR* das oito medições de cada estação por banda de 1/3 de oitava (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

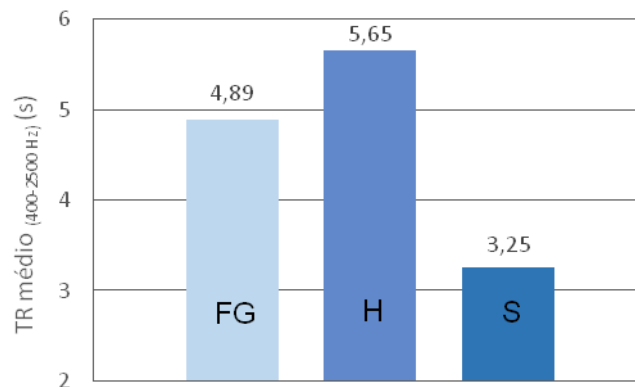


Fig. 8 - Tempo de Reverberação médio (400-2,5k Hz) de cada estação (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Quadro 1 - Resumo dos valores médios do *RASTI* e *TR*, e do *Volume*, para as três estações

Parâmetro	Heroísmo	Faria Guimarães	Salgueiros
L_{Aeq} ruído de fundo (dB)	84,0	76,6	71,1
<i>RASTI</i> médio	0,32	0,38	0,55
<i>TR</i> (400-2500 Hz)	5,65	4,89	3,25

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para perceber a razão para o *TR* ser tão diferente para estas estações com características idênticas, foram feitas análises aos parâmetros geométricos/arquitetónicos. As estações foram modeladas de forma simplificada apenas com o propósito de extrair o valor corresponde ao volume (Quadro 3). Seria de esperar que a estação com menor *TR* tivesse um volume menor, no entanto a estação de *Salgueiros*, que é a que possui o *TR* mais baixo, tem um volume bastante superior às outras estações com quase 7900 m³.

Outra análise foi feita tendo em conta as diferentes áreas acusticamente tratadas nas estações. Em reunião com os responsáveis do *Metro do Porto* foram referidas as intervenções acústicas nas estações em estudo, sendo que a única intervenção foi contemporânea à construção das mesmas. O material aplicado foi o sistema *BASWaphon* (painéis de lã mineral calibrados e de peso reduzido, colados sobre uma base - tecto falso - e posteriormente barrados em vários

passos com massa mineral de forma a obter uma superfície contínua com espessura total 30 mm). As áreas aplicadas na zona da plataforma, cf. informação da *Metro do Porto*, estão expressas no Quadro 2. A estação de *Salgueiros* tem a maior área de tratamento acústico (790 m²), *Faria Guimarães* e *Heroísmo* têm 600 e 550 m² respectivamente.

Foi elaborada uma correlação entre os valores da área de tecto acústico e o *TR* (Fig. 9) que aponta para uma forte relação ($R^2 = 0,98$) entre a quantidade de área tratada e o $TR_{\text{médio}}$. A estação com maior quantidade de tecto acústico aplicado é aquela com menor *TR*. É possível concluir que as condições acústicas sentidas nas estações estão aliadas às quantidades de material acústico aplicado, tendo um forte impacto nos valores do *TR*, que por sua vez dificulta muito a inteligibilidade e conduz a valores de *RASTI* baixos. Também os valores do ruído de fundo são afectados, pois todo o ruído que se propaga nas estações irá ser mais ou menos atenuado conforme o melhor ou pior tratamento acústico aplicado.

Quadro 2 – Áreas de tecto acústico e *TR* médio (400-2,5k Hz)

Estação	Área de tecto acústico (m ²)	<i>TR</i> médio (400-2,5k Hz) (s)
<i>Faria Guimarães</i>	600	4,9
<i>Heroísmo</i>	550	5,7
<i>Salgueiros</i>	790	3,3

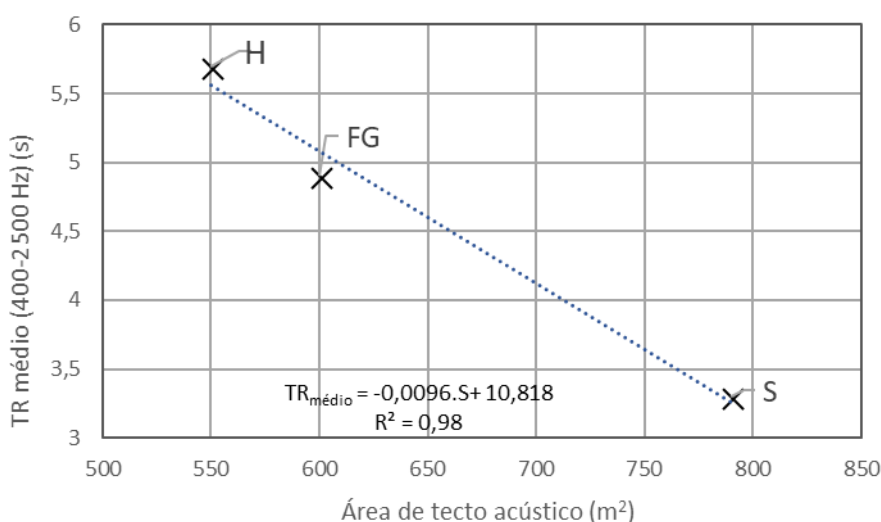


Fig. 9 - Relação entre o *TR* médio (400-2500 Hz) e as áreas de tecto acústico nas estações (FG - *Faria Guimarães*, H - *Heroísmo*, S - *Salgueiros*)

4 CUMPRIMENTO DA REGULAMENTAÇÃO (RRAE)

A legislação Portuguesa na área da Acústica em terminais de transportes de passageiros, como estações de metro, é o *Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)* [2]. No interior de átrios ou salas de embarque das estações (Volume > 350 m³) mobilados normalmente e sem ocupação, o *TR* correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava de 500, 1k e 2k Hz, deverá satisfazer a condição (V - volume interior): $TR_{500-2k\text{ Hz}} \leq 0,12 V^{1/3}$ (para espaços dotados de sistema público de mensagens). O recinto é considerado conforme aos requisitos acústicos quando o valor obtido para o *TR* diminuído do factor *I* no valor de 25% do limite regulamentar satisfaz o limite regulamentar.

O Quadro 3 apresenta os valores de *volume*, do *TR* regulamentar calculado pela equação acima (RRAE), do *TR* medido *in situ* e os valores do *TR* corrigidos do factor de incerteza *I* (25% do *TR* regulamentar).

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Quadro 3 – Comparação para as três estações, dos valores do *TR* regulamentar com o *TR* medido *in situ* e corrigido do factor *I* (25% do *TR* máx. regulamentar)

Estação	Volume aprox. (m ³)	<i>TR</i> máx. RRAE (s)	<i>TR</i> médio medido <i>in situ</i> (s)	<i>TR</i> medido <i>in situ</i> corrigido com <i>I</i> (s)	Verificação cf. RRAE	Δ (s)
<i>Faria Guimarães</i>	5054	2,06	4,89	4,38	KO	2,3
<i>Heroísmo</i>	5594	2,13	5,65	5,12	KO	3,0
<i>Salgueiros</i>	7855	2,39	3,25	2,66	KO	0,3

Pela análise do Quadro 3 nota-se que nenhuma dessas estações cumpre o limite regulamentar do *TR* estipulado pelo RRAE. As estações *Faria Guimarães* e *Heroísmo* ultrapassam o valor de *TR* em 2,3 s e 3,0 s, respectivamente. A estação *Salgueiros* é a única com uma diferença menor que 1,0 s do limite regulamentar.

Este incumprimento do regulamento (RRAE, 2002) poderia ter talvez justificação no facto desta exigência para o *TR* ter entrado em vigor já após a execução do projecto acústico das estações. Porém, a essa data, já estava executado o projecto acústico para as estações em estudo, cujas datas de inauguração são: *Faria Guimarães* e *Salgueiros* – 09/2005 e *Heroísmo* – 06/2004, pois nos projectos de acústica das estações (cedidos pela *Metro do Porto*) está já mencionada essa exigência regulamentar para o *TR* e verifica-se até aí o previsível cumprimento da referida legislação. A razão para actualmente não se verificar o cumprimento dos requisitos legais estará talvez relacionada com a degradação e consequente perda de eficácia ao longo dos anos do material acústico aplicado nas estações ou com um deficiente cálculo acústico inicial.

5. CONCLUSÕES

O Ruído de Fundo foi medido para três situações nas estações. No ponto 1 *sem* e *com* comboios a passar e no ponto 2 *sem* a passagem de comboios. As medições que incluem a passagem de veículos apresentam valores de até 84 dB(A) e superiores em 18 a 29 dB(A) à situação sem comboios. No entanto a diferença mais merecedora de comentário é a verificada entre os valores sem veículos nos pontos 1 e 2. Estes pontos estavam localizados na plataforma de embarque (pt. 1 junto à linha e pt. 2 na zona de acesso à plataforma). O segundo apresenta valores de L_{Aeq} 3 a 11 dB superiores aos valores do ponto 1 que se deve à existência de escadas rolantes que apesar de funcionarem de forma intermitente têm uma influência no ruído de fundo.

Em relação ao RASTI nota-se o *mau* comportamento acústico para as estações *Faria Guimarães* e *Heroísmo*, com valores médios de 0,38 e 0,32 respectivamente (classificação *Pobre* no que toca à inteligibilidade). *Salgueiros* tem um valor de 0,55 (inteligibilidade *Aceitável*). Existe uma diferença de 0,23 entre a estação de *Heroísmo* e *Salgueiros*, respectivamente a pior e a melhor a nível do RASTI. Foi possível notar em todas as estações uma pior inteligibilidade nas zonas junto à parede lateral face às zonas junto à linha. Percebeu-se também a forte ligação entre o RASTI e o *TR* (valores mais baixos de *TR* conduzem a melhores valores de RASTI).

Pelos resultados do *TR* é possível concluir que *Salgueiros* tem o melhor desempenho, pois apresenta um valor médio de 3,3 s valor muito inferior aos das estações de *Faria Guimarães* e *Heroísmo* com 4,9 e 5,7 s respectivamente (a diferença entre a melhor e a pior estação, é 2,4 s). O *TR* para as frequências baixas é bastante alto mas nas altas frequências altas, o *TR* é baixo, devido ao elevado volume de ar existente nas estações.

É de referir o incumprimento dos valores máximos da legislação (RRAE) para o *TR* em estações de transporte de passageiros.

A diferença acentuada entre os *TR* das estações, apesar de possuírem geometrias em planta semelhantes, incentivou o estudo da relação entre o *TR* e a arquitectura interior dos espaços.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Foi possível concluir, nesta pequena amostra de estações, que os valores de TR estão relacionados com a quantidade de tratamento acústico aplicado nos tectos antes da inauguração. A estação de *Salgueiros* que é a que tem maior área de tecto acústico é também a que possui menor TR , o oposto acontece para a estação de *Heroísmo*, que tem a menor área de tecto acústico aplicado e por sua vez tem o maior TR . Uma vez que o TR é tão condicionante para a inteligibilidade da palavra, pode também relacionar-se os valores de $RASTI$ com a quantidade de tecto acústico aplicado. À semelhança do TR , a estação de *Salgueiros* é a que possui melhores valores para o $RASTI$ e a de *Heroísmo* é que tem os valores mais baixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Costa, J. *Caracterização Acústica de Estações de Metro – Caso de Estudo: Metro do Porto*, Dissertação de Mestrado Integrado em Eng^a Civil, FEUP, 2018.
- [2] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Decreto-Lei 129/2002 de 11/5, posteriormente alterado pelo DL 96/2008 de 9/6.