

## DESEMPENHO ACÚSTICO DE UM PAINEL RECONFIGURÁVEL PARA UM AUDITÓRIO MULTIUSOS

Gaspar, A.<sup>1</sup>; Pereira, A.<sup>2</sup>; Godinho, L.<sup>3</sup>; Amado Mendes, P.<sup>4</sup>; Mateus, D.<sup>5</sup>

Universidade de Coimbra, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos, Polo 2 da  
Universidade - Pinhal de Marrocos, Coimbra (Portugal)

### Resumo

No âmbito da acústica de salas, o desenvolvimento de um projeto acústico que permita adaptar um auditório multiusos a diferentes utilizações (distintos tipos de música e oratória), constitui um desafio. A solução a implementar deverá cumprir os requisitos acústicos necessários para uma sala multiusos e ser esteticamente interessante. Geralmente os projetistas optam por uma solução fixa que sirva todas as funcionalidades, com conseqüente desempenho acústico condicionado. Uma alternativa poderá consistir na utilização de soluções de acústica variável que permitam uma flexibilização das características acústicas do espaço, por forma a adaptar os ambientes a várias funções.

Neste trabalho, pretende-se realizar um estudo prévio para o desenvolvimento de um painel acústico reconfigurável que possibilite ajustes graduais na absorção sonora, de modo a estabilizar a reverberação da sala em função de diferentes tipos de utilização do espaço. A análise do desempenho acústico do painel será realizada para um caso de estudo específico, utilizando um Método Estocástico denominado traçado de raios, de modo a identificar as características de absorção que permitirão introduzir alterações nas condições acústicas de um ambiente.

**Palavras-chave:** Acústica de salas, auditório multiusos, acústica variável.

### Abstract

Within the scope of room acoustics, the development of an acoustic project that allows adapting a multipurpose auditorium to different uses (different types of music and oratory), is a challenge. The solution to be implemented should comply with acoustic requirements for a multi-purpose room and be esthetically interesting. Generally, designers opt for a fixed solution that attends all uses, with consequent limited acoustic performance. An alternative possibility could be the use of variable acoustic solutions that allow flexibility of the acoustic characteristics of the space in order to adapt the environments to different uses.

This work aims to carry out a preliminary study for the development of a reconfigurable acoustic panel that allows gradual adjustments in sound absorption, in order to stabilize the reverberation of the room according to different types of use. The analysis of the acoustic performance of the panel will be performed for a specific case study using a Stochastic Method called Ray Tracing, in order to identify the absorption characteristics that will allow to introduce changes in the acoustic conditions of an environment.

**Keywords:** Room acoustics, multipurpose auditorium, variable acoustic.

**PACS no.** 43.20.Dk, 43.55.Ka

## 1 Introdução

Durante a elaboração de um projeto de acústica para um auditório multiusos existem requisitos distintos em relação aos parâmetros utilizados para música (ambiente com mais vivacidade) e para oratória (elevado grau de compreensão da palavra) a que é necessário atender.

Um recurso que é utilizado para se conseguir obter um grau maior de utilização do espaço com um desempenho acústico adequado consiste na utilização de técnicas de acústica variável. Estas técnicas baseiam-se em três possibilidades: a primeira seria através da alteração do volume do espaço que é influenciado pela geometria ou arquitetura da sala; a segunda forma consiste na utilização de soluções de revestimentos de absorção sonora distinta, cujo desempenho acústico e percentagem de aplicação, condicionam a área de absorção equivalente do espaço; a terceira forma de alcançar alterações consideráveis no tempo de reverberação reside no uso de sistemas de eletroacústica. As soluções de acústica variável mais comuns são compostas por painéis articulados, *banners* acústicos, cortinas retráteis, refletores móveis e poltronas ajustáveis [1,2,3].

Neste trabalho, realiza-se um estudo prévio considerando um auditório genérico para avaliar o comportamento de um sistema de acústica variável modular. O sistema é formado por prismas triangulares, que giram segundo o próprio eixo, ao longo de uma rotação completa (360°), permitindo exibir cada uma das três faces, com diferentes propriedades absorvente, refletora e difusora.

## 2 Configuração do auditório

O auditório cuja configuração genérica foi considerada neste estudo, possui 409 lugares e um volume de 3779 m<sup>3</sup>. A geometria e disposição dos materiais estão descritos na Figura 1.

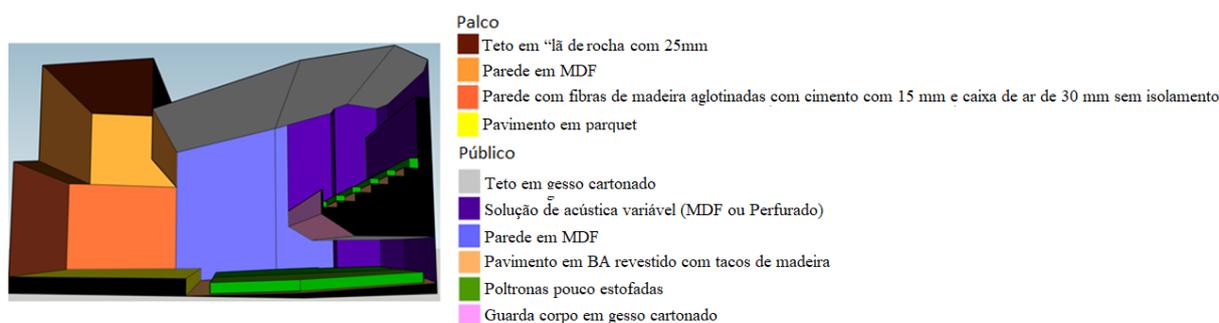


Figura 1 – Perspetiva esquemática do auditório em estudo.

Para a simulação foram considerados 56 recetores ao longo da plateia, divididos em 5 zonas (sendo A e B na área da plateia e C, D e E na área do balcão) e uma fonte sonora omnidirecional, A0, posicionada no centro do palco. A disposição dos recetores e fonte sonora podem ser visualizados na Figura 2. A divisão por zonas se deu para auxiliar no tratamento de dados, de modo a possibilitar um entendimento melhor do comportamento espacial dos parâmetros analisados.

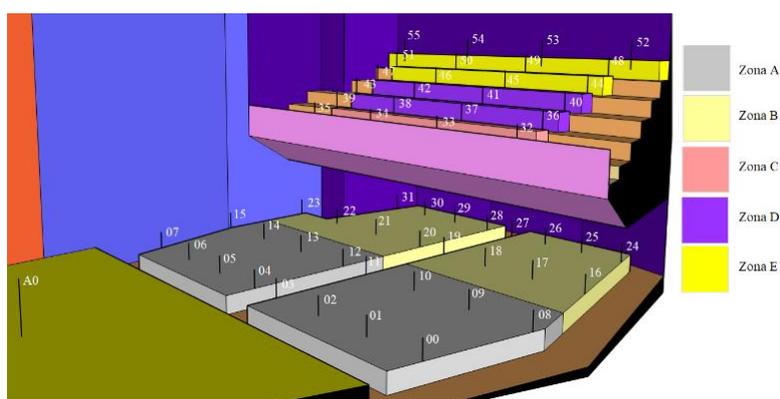


Figura 2 – Posição da fonte e dos recetores.

O foco do trabalho consiste na simulação de um sistema de acústica variável modular, ilustrado de forma esquemática na Figura 3, que corresponde a um prisma triangular, que é colocado nas paredes ao fundo do auditório. Cada face possui uma propriedade acústica diferente para se adaptar a múltiplas necessidades de utilização. O prisma possui duas faces definidas, sendo uma com material absorvente, com previsão de utilização durante eventos destinados a oratória, e outra com material refletor, com foco de uso durante situações que necessitam de um ambiente com maior reverberação como é caso da música (concertos).

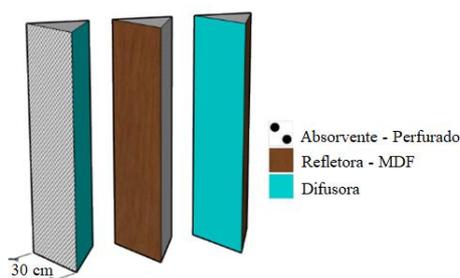


Figura 3 – Sistema de acústica variável modular em formato de prisma triangular.

### 3 Simulação

O método utilizado para a simulação do auditório foi o traçado de raios, através de um código desenvolvido na Universidade de Coimbra que utilizou 60 mil raios durante o cálculo. O método utiliza um grande número de partículas (raios), emitidos por uma fonte sonora omnidirecional. Os raios percorrem a sala perdendo energia a cada reflexão de acordo com o coeficiente de absorção das superfícies [4]. Por meio deste método é possível calcular diversos parâmetros acústicos objetivos, sendo, neste caso, analisados o Tempo de Reverberação, o nível de pressão sonora, a Definição (D50), a Claridade (C80) e o Índice de Transmissão da linguagem (STI).

No que diz respeito à simulação, os coeficientes de absorção sonora utilizados para as diversas superfícies do auditório constam da Tabela 1, e foi levado em consideração o efeito de dispersão nas várias superfícies, através do coeficiente de dispersão, que foi sempre considerado maior ou igual a 0,1.

Tabela 1 – Coeficientes de absorção sonora considerados.

	Materiais	Coeficientes de absorção sonora ( $\alpha$ )					
		125	250	500	1000	2000	4000
Palco	Teto em "lã de rocha com 25 mm"	0,25	0,60	0,65	0,95	0,95	0,95
	Parede em MDF	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
	Parede com fibras de madeira aglomeradas com cimento com 15 mm e caixa de ar de 30 mm sem isolamento	0,10	0,15	0,40	0,75	0,45	0,55
	Pavimento em parquet	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Plateia e Balcão	Teto em gesso cartonado	0,12	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06
	Parede em MDF	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
	Pavimento em BA revestido com tacos de madeira	0,02	0,04	0,05	0,04	0,10	0,05
Balcão	Poltrona pouco estofadas	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55
	Guarda corpo em gesso cartonado	0,12	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06
	Face refletora do prisma triangular (MDF)	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
	Face absorvente do prisma triangular (Perfurado)	0,29	0,80	0,99	0,80	0,60	0,55

#### 4 Tempo de reverberação

Por definição, o Tempo de Reverberação ( $T_r$ ) equivale ao intervalo de tempo necessário para se verificar um decaimento do nível sonoro de 60 dB logo após a paragem súbita da fonte sonora. Sendo o parâmetro utilizado inicialmente na avaliação acústica de um espaço fechado, este é um fator determinante em relação à utilização do ambiente analisado, uma vez que, para o caso de oratória, são utilizados Tempo de Reverberação baixos, para se poder ter uma melhor inteligibilidade das palavras, enquanto que, para ambientes destinados à música, são considerados valores mais elevados, uma vez que é preciso criar ambientes mais “vivos”, com uma maior difusão [1].

Durante a elaboração do projeto deve-se verificar o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [5], mais especificamente o Artigo 10.º-A Auditórios e salas, que impõe uma referência regulamentar para o Tempo de Reverberação, não excluindo um estudo referente a outros parâmetros. No caso da oratória, a referência do tempo de reverberação é baseada no volume do espaço, enquanto que, em relação à música, deve-se realizar um estudo que seja adequado a esta utilização do espaço.

De acordo com o RRAE, no contexto deste trabalho, considera-se que o Tempo de Reverberação médio,  $T$ , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz deve satisfazer a seguinte equação:

$$ii) T \leq 0,32 + 0,17 \log V, \text{ se } 250 \leq V < 9000 \text{ m}^3, (1)$$

onde  $V$  é o volume interior do recinto, em metros cúbicos.

O volume do auditório corresponde a 3779 m<sup>3</sup>, devendo o tempo de reverberação regulamentar ser, assim, inferior a 0,9 s.

Devido ao facto do RRAE não fornecer um valor de referência quando o espaço é utilizado para música, será analisado o tempo de reverberação sugerido por Arau [6]. Neste caso, também é levado em consideração o volume do espaço e estabelece-se um tempo de reverberação médio ótimo máximo e mínimo, conforme definido na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo de reverberação de acordo com tipo de utilização do espaço [6].

Higini Arau-Puchades	
Tipo de utilização	Tempo de reverberação (Tr)
Teatro	$T_{med\ otimo\ max} = 0,368 V^{0.1505}$ $T_{med\ otimo\ min} = 0,264 V^{0.1394}$
Ópera	$T_{med\ otimo\ max} = 0,509 V^{0.1325}$ $T_{med\ otimo\ min} = 0,396 V^{0.1273}$
Câmara	$T_{med\ otimo\ max} = 0,5123 V^{0.1328}$ $T_{med\ otimo\ min} = 0,4245 V^{0.1331}$
Concerto	$T_{med\ otimo\ max} = 0,600 V^{0.1325}$ $T_{med\ otimo\ min} = 0,5125 V^{0.1328}$

Os valores referentes aos tempos de reverberação, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, estipulados por Higini Arau de acordo com o volume do auditório e utilização são:

Tabela 3 – Tempo de reverberação de acordo com a utilização.

Teatro	Tmax	1,3	Mínimo
	Tmin	0,8	
Ópera	Tmax	1,5	
	Tmin	1,1	
Câmara	Tmax	1,5	
	Tmin	1,3	
Concerto	Tmax	1,8	Máximo
	Tmin	1,5	

Na Figura 4, apresentam-se os valores de Tr médio, obtidos a partir das várias posições de recetor, referentes às duas configurações acústicas extremas (mínimo, com face exposta absorvente, e máximo, com face exposta refletora) conseguidas através da utilização do sistema modular de acústica variável, sendo possível verificar que, com exceção da banda de oitava dos 125 Hz, existe uma grande variação entre as duas configurações.

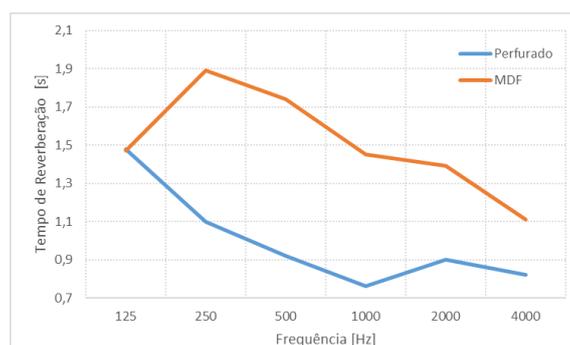


Figura 4 – Tempo de reverberação global dos casos extremos.

#### 4.1 Solução para oratória

Analisando o tempo de reverberação global do auditório, que se encontra representado na Tabela 4, utilizando a face mais absorvente do prisma triangular, constata-se que o auditório cumpre o requisito imposto pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 (RRAE).

Tabela 4 – Média referente ao valor global do tempo de reverberação para o caso da oratória

Frequência (Hz)	500	1000	2000
T30 (s)	0,9	0,8	0,9
Média (s)	0,9		
RRAE - Tr(s)	0,9		

Na Figura 5, encontram-se os valores divididos por zonas e verifica-se que existe uma uniformidade em relação ao tempo de reverberação que se regista nas várias zonas do auditório.

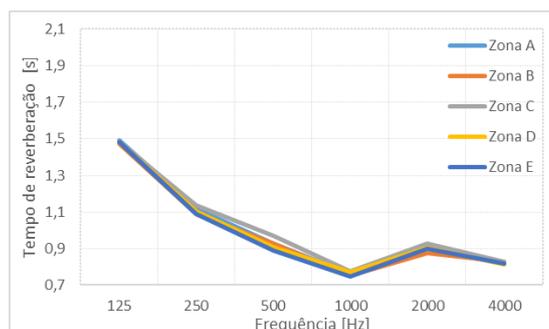


Figura 5 – Tempo de reverberação para oratória dividido por zonas.

## 4.2 Solução para música

No caso do tempo de reverberação global para utilização em eventos musicais, configurou-se o auditório com a face da solução prismática refletora orientada para a sala, tendo-se obtido o valor que consta da Tabela 5. Para esta utilização, a análise é feita utilizando os limites propostos por Higini Arau, para uma utilização de concerto, o qual exige um valor de tempo de reverberação mais elevado. Verifica-se que, quando é utilizada a face refletora, é possível cumprir o valor mínimo estipulado por este autor (conforme Tabela 3).

Tabela 5 – Média referente ao valor global do tempo de reverberação para o caso da música de concerto

Frequência (Hz)	500	1000	2000
T30 (s)	1,7	1,5	1,4
Média (s)	1,5		

Em relação ao tempo de reverberação dividido por zonas, (ver Figura 6), verifica-se que apenas nos 2000 Hz há uma pequena variação entre as zonas da plateia e balcão, sendo, no geral, os resultados bastante uniformes.



ouvido humano, 1 dB de variação nos níveis seria aceitável, no entanto, a partir de 5dB, fica clara a mudança, o que poderia gerar reclamações dos utentes [2]. Na presente situação, as variações de nível sonoro ao longo da sala são inferiores ou iguais a 2dB, não ultrapassando este limite.

Tabela 6 – Valores da variação dos níveis sonoros ( $\Delta L$ ) entre fonte e linha de recetores no caso da oratória.

Distância entre linha de recetores e fonte (m)	Fonte sonora [dB] 90				(corresponde a 1 metro da fonte sonora)					
	Plateia				Balcão					
7,2	10,6	14,0	17,4	12,7	14,4	14,7	15,8	16,8	17,5	
Leq [dB]	85	84	85	83	83	83	84	84	84	84
$\Delta L$ [dB]	5	6	5	7	7	7	6	6	6	6

## 5.2 Solução para música

Na Figura 8 está representado o nível de pressão sonora em cada posição do recetor quando a face refletora do prisma está exposta.

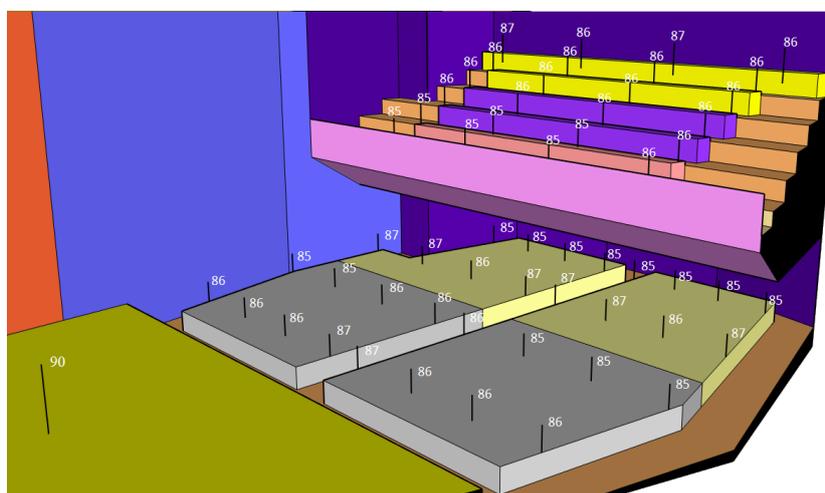


Figura 8 – Mapa global do nível sonoro equivalente no caso da música.

A Tabela 7 mostra a variação dos níveis sonoros ( $\Delta L$ ) no caso de música, que corresponde também à diferença entre o nível sonoro a 1 m da fonte sonora e o nível sonoro na fila correspondente de recetores. No caso da plateia existe uma menor variação do nível sonoro na linha de recetores a 14 m da fonte, devido à sua localização. Os valores obtidos nesta situação não possuem uma variação a ponto de causar problemas para os utentes, sendo a distribuição de nível sonoro bastante uniforme ao longo da sala.

Tabela 7 – Valores da variação dos níveis sonoros ( $\Delta L$ ) entre fonte e linha de recetores no caso de música.

Distância entre linha de recetores e fonte (m)	Fonte sonora [dB] 90				(corresponde a 1 metro da fonte sonora)					
	Plateia				Balcão					
7,2	10,6	14,0	17,4	12,7	14,4	14,7	15,8	16,8	17,5	
Leq [dB]	86	85	87	85	85	85	86	86	87	87
$\Delta L$ [dB]	4	5	3	5	5	5	4	4	3	3

## 6 Parâmetros de qualidade acústica

### 6.1 Definição (D50)

O parâmetro Definição está relacionado com a inteligibilidade da palavra. Esta mede, em escala linear, a razão entre a energia contida nas primeiras reflexões (50 ms) e a energia total da resposta ao impulso, conforme a seguinte expressão:

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2)$$

Quanto maior o valor de D50, melhor será a capacidade do ouvinte de diferenciar cada sílaba, sendo que valores acima de 50% são considerados aceitáveis [2].

#### 6.1.1 Solução para oratória

A Figura 9 apresenta os valores de Definição, que correspondem a médias por Zonas. Na frequência de 125 Hz só são obtidos valores acima dos 50% nas Zonas B e E, devido ao facto de estarem numa região em que os revestimentos apresentam maior absorção. Na faixa entre 250 e 4000 Hz são obtidos valores acima dos considerados aceitáveis, variando entre 55% e 84%.

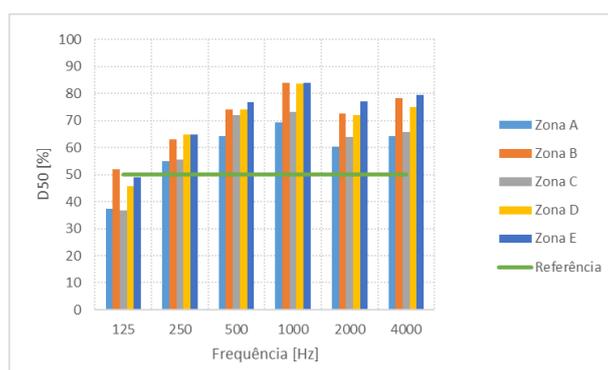


Figura 9 – Definição (D50) dividida por zonas, utilizando a face absorvente do prisma triangular.

### 6.2 Claridade musical (C80)

A Claridade é um parâmetro associado à caracterização de um espaço destinado a música. O cálculo é realizado através da razão, em escala decibel, entre a energia contida nas primeiras reflexões, correspondendo a 80 ms, pela energia contida na cauda reverberante, de acordo com a seguinte equação [7]:

$$C80 = 10 \log \left( \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (3)$$

De acordo com Arau [6], é definida uma classificação de valores (ver Tabela 8), que são considerados ideais para cada tipo de utilização do ambiente:

Tabela 8 – Índice de claridade musical (C80) de acordo com a utilização do espaço.

Sala de teatro	$C80 > 6\text{dB}$
Sala de ópera	$2\text{dB} < C80 < 6\text{dB}$
Sala de concerto	$-2\text{dB} < C80 < 4\text{dB}$

### 6.2.1 Solução para música

Na Figura 10 apresentam-se as médias por zonas, verificando-se que, nas Zonas A, C e D, os valores se enquadram no que diz respeito a sala de concertos, segundo a Tabela 8. Já as Zonas B e E acabam tendo valores superiores a partir dos 1000 Hz.

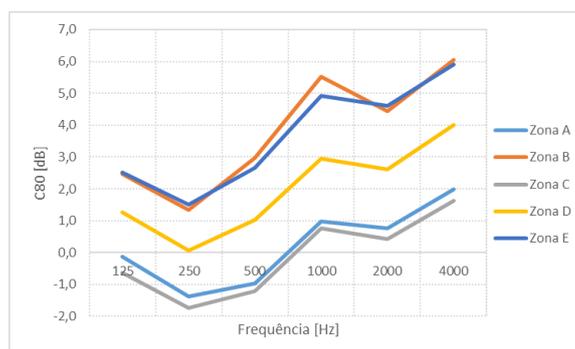


Figura 10 – Claridade musical (C80) dividida por zonas, utilizando a face refletora do prisma triangular.

### 6.3 Speech transmission index (STI)

O Speech Transmission Index é um critério utilizado para quantificar o grau de inteligibilidade da palavra, tendo valores entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade ótima) (ver Tabela 9). O STI é medido através da modulação do sinal da fala, partindo da condição de que a fala é um sinal modulado em amplitude, sendo que, para que tenha boa inteligibilidade, deve ter o mínimo de deformação possível [8].

Tabela 9 – Avaliação subjetiva do grau de inteligibilidade (STI).

STI	< 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	0,60 – 0,75	≥ 0,75
	Ruim	Pobre	Aceitável	Bom	Excelente

#### 6.3.1 Solução para oratória

A análise deste parâmetro é indispensável no caso da oratória para verificar o grau de inteligibilidade da palavra no ambiente sonoro. No presente caso de estudo, os valores de STI variam entre 0,62 e 0,71, conforme se verifica da análise da Figura 11, caracterizando-se a solução como Boa para oratória, de acordo com a Tabela 9.



Figura 11 – STI para o caso da oratória dividido por zonas.

### 6.3.2 Solução para música

Apesar do STI ser um parâmetro utilizado na avaliação da inteligibilidade da fala, foi verificado o ganho que se obteve no caso da oratória quando comparamos com os valores obtidos para música. No caso da utilização da face refletora do prisma, os valores de STI variaram entre 0,52 e 0,63, conforme se observa na Figura 12, o que, segundo a Tabela 9, é considerado entre Aceitável e Bom. Quando comparamos com os valores obtidos se se utiliza a face absorvente, verifica-se que ocorre um aumento deste indicador em cerca de 10%.

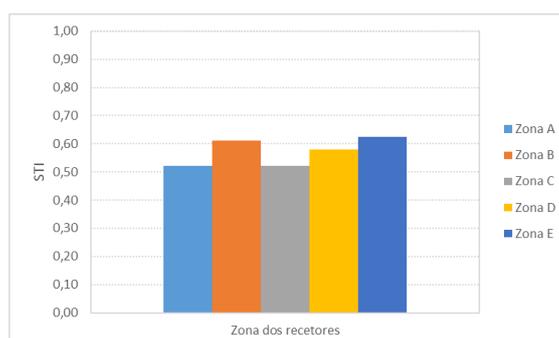


Figura 12 – STI para o caso de música dividido por zonas.

## 7 Conclusão

Neste artigo foi realizado um estudo prévio para avaliar o comportamento de uma solução de acústica variável modular, em um auditório com funcionalidade multiuso. O sistema é modular e composto por um prisma triangular onde uma das três faces está definida com material absorvente e a outra com material refletor, sendo a terceira face difusora. É possível concluir que o sistema modular proposto possui capacidade para garantir flexibilidade acústica do ambiente, visto que os tempos de reverberação das duas situações analisadas se enquadraram nos valores regulamentares e sugeridos, bem como os restantes indicadores acústicos analisados. Em relação ao STI, refere-se ainda que existe um ganho considerável no caso da oratória quando comparamos com a situação de música.

Esta análise contribui para uma melhor compreensão da variação que é possível assegurar nos parâmetros acústicos de uma sala com um sistema de acústica variável baseado em prismas triangulares, usando soluções acusticamente realistas e exequíveis. A inclusão de uma terceira face com características distintas (por exemplo com características de dispersão mais fortes) poderá constituir uma solução com uma flexibilidade ainda maior para este sistema.

## Agradecimentos

Este trabalho é financiado com fundos FEDER através do Programa Operacional de Fatores de Competitividade - COMPETE no âmbito do projeto ADJUST - Desenvolvimento de painéis acústicos progressivamente ajustáveis com atuação inteligente - Projeto SII & DT CENTRO-01-0247-FEDER-033884, sendo parcialmente financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Fatores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito da unidade de investigação “Institute for sustainability and innovation in structural engineering - ISISE” (UIDP/04029/2020) e através do Programa Operacional Regional CENTRO2020 no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006.

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

## Referências

- [1] M. Barron, Acoustics for multi-purpose use, “*Auditorium Acoustics and Architectural Design*”, Second., London and New York: Spon Press, (2010).
- [2] Isbert, Antoni Carrion. Diseño Acustico De Espacios Arquitectonicos. Barcelona: Universidad Politecnica De Cataluña, 1998.
- [3] Möller, Henrik. "Challenges of design of smaller multi-purpose." EuroRegio.
- [4] Rindel, J. H. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. s.l.: Journal of Vibroengineering, 2000 No 3(4), p. 219-224, 2000.
- [5] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) - Decreto-Lei n.º 96 - Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. 2008.
- [6] Arau, Higiní. ABC de la Acústica Arquitectónica. Barcelona: Ceac, 1999.
- [7] Reichardt, W.; Alim, O.A.; Schmidt, W. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances. Acta Acustica united with Acustica, 32 (3):126-137, 1975.
- [8] Rossing, Thomas, ed. Springer handbook of acoustics. Springer Science & Business Media, 2007.