

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DESENHO DE UMA SALA NA SUA QUALIDADE ACÚSTICA – O CASO DE ESTUDO DE UM TEATRO COM 760 LUGARES EM COIMBRA

PACS: 43.55.Br, 43.55.Gx

Mateus, Diogo; Pereira, Andreia
ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade
de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade
3030-788 Coimbra
Portugal
Tel: +351-239797196
diogo@dec.uc.pt ; apereira@dec.uc.pt

Palabras Chave: reabilitação acústica, reverberação, qualidade sonora, inteligibilidade

ABSTRACT

In rooms intended for theatrical activities and other types of speech-based uses, it is essential to ensure a high intelligibility of the oral message, both for spectators and for actors. With this purpose, it is essential that the design of the room and the type of linings allow to avoid acoustic defects, such as echoes, focusing and floating echoes. In this context, a case study is here presented regarding a theatre with 760 seats, where the acoustics is assumed in general to be of reasonable quality in the audience zone, but in the stage clear acoustic problems are perceived, originated mainly by echoes, which meanwhile have been corrected. The approach here used is based on measurements performed on the theatre before and after the implementation of correction measures.

RESUMO

Em salas destinadas a atividades teatrais e outros tipos de utilizações assentes na oratória, é fundamental garantir uma elevada inteligibilidade e compreensão da mensagem oral, quer para os espectadores, quer para os atores. Para o efeito, é fundamental que o desenho da sala e o tipo de revestimentos permita evitar o aparecimento dos chamados defeitos acústicos, como os ecos, a focalização e os ecos flutuantes. Neste contexto, é apresentado um caso de estudo, sobretudo baseado em medições acústicas, de um teatro com 760 lugares, e com uma acústica considera favorável, mas com claras insuficiências ao nível do palco, originadas sobretudo por ecos, que entretanto foram corrigidas.

1. INTRODUÇÃO

Quando se projeta um espaço destinado a atividades teatrais, ou outras utilizações assentes na oratória, deve considerar-se como objetivo principal um elevado grau de compreensão oral e conseqüentemente uma elevada inteligibilidade da palavra para todos os pontos da sala, quer para os espectadores, quer para os atores [1]. Em salas com multifunções, que podem ser utilizadas para fins tão diversos como teatro ou concertos musicais, e onde não é possível

recorrer a uma forte componente de soluções de acústica variável, são normalmente adotadas soluções de compromisso, que passam geralmente por restringir a aplicação de superfícies fonoabsorventes e por adaptar o desenho da sala de forma a garantir uma adequada distribuição das reflexões por todos os lugares da sala, mas evitando o aparecimento dos chamados defeitos acústicos, como os ecos, a focalização e os ecos flutuantes. Neste contexto, é apresentado um caso de estudo de um teatro com capacidade para cerca de 760 lugares sentados, construído em Coimbra nos anos 60 do século passado, e remodelado no início deste século. Apesar da acústica deste espaço ser considerada bastante favorável pela generalidade dos espectadores, ao nível do palco, por parte dos atores, sentiam-se algumas insuficiências acústicas, nomeadamente ecos. Com vista a minimizar a influência destes ecos foi realizado um estudo desta sala, que passou inicialmente pelo levantamento das condições acústicas da sala, quer passivas, quer utilizando o sistema eletroacústica da sala, através de um conjunto alargado de medições acústicas. Após a identificação das principais insuficiências acústicas da sala, o referido estudo apresentou uma proposta de soluções corretivas de reabilitação acústica, que, face às disponibilidades do Dono de Obra, teria de passar obrigatoriamente por soluções localizadas, de rápida implementação e com custos controlados. Finalmente, após a implementação das soluções consideradas viáveis, procedeu-se novamente à avaliação experimental das condições acústicas, de forma a possibilitar uma avaliação das melhorias introduzidas. Neste artigo são apresentados alguns dos resultados obtidos, considerados mais relevantes.

2. Qualidade sonora de espaços fechados - Generalidades

De um modo geral, o condicionamento acústico de um edifício, como forma de garantir um adequado conforto acústico no seu interior, pode ser concretizado através da atuação articulada segundo quatro vertentes da acústica: o isolamento a sons aéreos, quer entre espaços interiores, quer entre o exterior e o interior dos edifícios; o isolamento de ruídos de percussão, transmitidos por via sólida, provenientes essencialmente do interior do edifício; o condicionamento acústico interior; e a minimização do ruído produzido por equipamentos mecânicos do edifício.

No presente artigo, conforme já referido, será dado especial destaque ao condicionamento acústico interior (palco, plateia e balcão) do teatro em estudo, em particular ao nível da avaliação experimental de parâmetros de qualidade sonora e à deteção dos chamados defeitos acústicos, como os ecos, a focalização e os ecos flutuantes. O estudo do condicionamento acústico interior, de um espaço fechado, depende sobretudo da geometria do espaço, do tipo de revestimentos interiores e do recheio (mobiliário e ocupação), e visa a obtenção de um ambiente acústico adequado ao seu volume e às suas funções.

A avaliação da qualidade acústica de espaços fechados pode ser avaliada com base num conjunto alargado de parâmetros, que procuram quantificar a resposta subjetiva dos utentes desses espaços. Grande parte destes parâmetros, habitualmente designados de “parâmetros de qualidade sonora”, pode ser avaliada, quer em fase de projeto, quer através de medições acústicas *in situ*. Na fase de projeto, a determinação destes parâmetros poderá ser obtida recorrendo à modelação numérica, nomeadamente ao modelo “Ray Tracing”, através da utilização de programas de cálculo automático. Após a construção destes espaços, ou eventualmente antes quando se tratam de espaços já existentes a reabilitar, como acontece na presente situação, é também possível caracterizar o campo sonoro que se estabelece no seu interior e determinar os referidos parâmetros de qualidade sonora, através dos procedimentos indicados nas normas ISO 3382:1,2 [2,3].

Apresentam-se de seguida alguns dos “parâmetros de qualidade sonora” considerados mais relevantes na presente situação [2,3,4,5].

Tempo de Reverberação (T_r) - O tempo de reverberação define-se como sendo o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora, num recinto fechado, diminua 60 dB, após a interrupção da emissão sonora. Na presente situação, este parâmetro foi calculado com

base no decaimento de energia sonora entre -5 dB e -25 dB, e extrapolado para 60 dB de decaimento. Para além de T_r é também apresentado o parâmetro T , que corresponde ao valor médio obtido a partir das bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz.

Tempo de reverberação mais cedo (EDT) – O tempo de reverberação mais cedo corresponde ao tempo de reverberação determinado para os primeiros 10 dB de decaimento do som, igualmente extrapolado para um decaimento de 60 dB. Este parâmetro é comparável ao T_r e permite estimar a relação entre a energia sonora resultante, imediatamente após o som ser emitido e a energia global. Possibilitando assim a avaliação do efeito das primeiras reflexões, que são as mais percebidas pelos ouvintes.

“Bass Ratio” (BR) - Relação entre a soma dos tempos de reverberação (T_r) nas bandas de oitava de 125 e 250 Hz e a soma de T_r nas bandas de oitava de 500 e 1000 Hz.

Inteligibilidade de Palavra "RASTI" - Índice de transmissão rápida de linguagem, que utiliza uma escala que varia de 0 a 100%, onde o “0” corresponde a uma inteligibilidade nula, enquanto que o valor “100” corresponde a uma inteligibilidade perfeita (na prática ambas inatingíveis). Este parâmetro é obtido com recurso a uma fonte que emite um sinal modulado e um recetor que analisa a distorção desse mesmo som. Para além deste índice também é possível avaliar, experimentalmente ou através de modelos de previsão, o índice STI (Speech Transmission Index), semelhante ao RASTI mas obtido de uma forma mais “robusta”. No índice RASTI apenas se consideram as oitavas de 500 e 2000 Hz, com um total de 9 índices de modelação, enquanto que no índice STI consideram-se as oitavas de 125 a 8000 Hz, com um total de 98 índices de modelação.

Definição (D50) - Parâmetro determinado através da relação entre a energia registada nos primeiros 50 msec (som direto e primeiras reflexões) e a energia total. Este valor é expresso em percentagem (ou eventualmente numa escala de 0 a 1), por bandas de frequência, e quanto maior for melhor será a inteligibilidade da palavra. Em vez da avaliação alargada deste parâmetro em bandas de oitava é frequente a utilização de um valor médio, obtido a partir da média dos resultados obtidos nas oitavas de 500 e 2000 Hz (no presente estudo identificado como $D_{500,2000}$).

Clareza Musical (C80) - Parâmetro que relaciona a energia registada nos primeiros 80 msec (som direto e principais reflexões) e a energia a partir dos 80 ms (reflexões tardias), numa escala logarítmica, em dB. Este parâmetro é sobretudo relevante para salas de concertos, mas o intervalo de valores recomendados não é totalmente consensual.

Variação dos níveis sonoros (ΔL) – Variação espacial, no interior da sala, dos níveis de pressão sonora, em dB(A), em relação a um ponto específico, que na presente situação corresponde ao lugar central da primeira fila da plateia (mais próximo do palco), para um espectro de ruído emitido próximo de “ruído branco”.

Entre os parâmetros anteriormente apresentados existem alguns cuja avaliação dos resultados não oferece grandes dúvidas, nomeadamente o índice RASTI e a Definição sonora (D50), que, de uma forma geral, quanto mais elevado melhor será a qualidade sonora, mas, na realidade, e até mesmo para estes dois parâmetros, os requisitos são variáveis em função do tipo de utilização pretendida. Em alguns casos, como acontece com os tempos de reverberação e com a clareza musical, diferentes autores apresentam requisitos diferentes para o mesmo tipo de utilização. Por outro lado, e em particular para salas de música e concertos, podem ainda ser considerados muitos outros parâmetros, quer de análise “objetiva”, quer parâmetros “subjetivos”, em que a avaliação da qualidade acústica de uma sala é realizada a partir de apreciação musical dentro da sala, efetuada por diversas impressões acústicas simultâneas.

Em Portugal, e no que se refere aos requisitos técnico-funcionais dos edifícios, encontra-se atualmente em vigor o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios [6], e no qual são também apresentados requisitos específicos para auditórios e salas (artigo 10º-A). Contudo, este artigo acaba por dar alguma flexibilidade ao projetista, apresentando apenas requisitos específicos para os níveis de ruído admissíveis, índices de isolamento, no caso de salas de cinema, e tempo de reverberação médio T , no caso de auditórios e salas cuja principal valência

corresponde a atividades assentes na oratória. Na presente situação, e considerando que o Teatro em estudo apresenta um volume total da ordem de 5600 m³ e as atividades principais assentam na oratória, esse limite máximo para o valor de T é próximo de 1s. Por exemplo, segundo Arau-Puchades [7], para a função de teatro e para o referido volume o tempo de reverberação médio, neste caso a média entre as oitavas de 500 e 1000 Hz, deve situar-se entre cerca de 0.9 e 1.3 s. No extremo oposto, se esta sala tivesse como função principal os concertos (musica sinfónica), a mesma referência aponta para um intervalo entre 1.6 e 1.9 s.

Numa situação ideal, em função do tipo de utilização específica da sala, a reverberação, bem como a generalidade dos parâmetros de qualidade sonora, deveriam variar significativamente, o que obrigaria a uma forte utilização de dispositivos de acústica variável (por exemplo através de elementos amovíveis e/ou de dupla face, nomeadamente painéis rotativos com uma face refletora e outra face fonoabsorvente). Contudo, para a generalidade das situações, devido às limitações e condicionantes existentes, opta-se geralmente por considerar apenas elementos de revestimento fixos, sendo as alterações de reverberação da sala referentes à ocupação, ao recheio e cenários a criar e, em alguns casos, à materialização de um palco mais reduzido e de baixa absorção sonora, por exemplo, através de uma concha acústica amovível.

3. AVALIAÇÃO ACÚSTICA INICIAL E SOLUÇÕES PROPOSTAS

Com vista à caracterização das condições acústicas iniciais, antes das correções pontuais introduzidas no presente caso de estudo, e deteção de eventuais “defeitos acústicos”, foi efetuada através de medições acústicas no local. Estas medições foram realizadas com base na norma ISO 3382:1 [2], recorrendo à utilização de uma fonte omnidirecional, Dodecaédrica, modelo “DO12 - 01dB-Stell” e a um analisador portátil (modelo “Symphonie - 01dB-Stell”, ligado a um PC portátil, com a aquisição e o tratamento através do software “dBati32 - 01dB-Stell”). O ruído de teste utilizado nestes ensaios foi gerado através da técnica de correlação “sequências de comprimento máximo” (maximum length sequences – MLS), com sinal criado a partir do referido sistema de aquisição e tratamento, através de módulo específico denominado de “Critério de Salas”. Para além da referida fonte omnidirecional foi também utilizado o próprio sistema eletroacústico da sala, com difusão sonora através de 4 colunas de som: duas situadas sobre o palco, que incorporam também uma forte componente de subgraves; e duas situadas na parte superior da boca de cena (ver Figura 1). Os ensaios foram realizados com o palco amplo, mas com o sistema de bambolinas montado em toda a envolvente do palco, lateral e posterior.

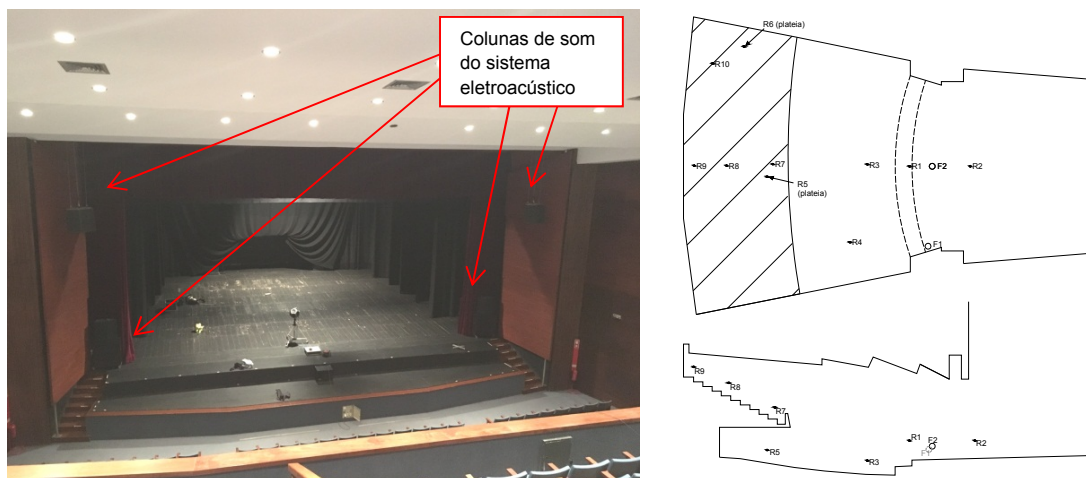


Figura 1 – Localização das colunas de som do sistema eletroacústico da sala (no palco) e esquema com a localização dos pontos principais de receção e de emissão (para a fonte omnidirecional).

Na Figura 2, á esquerda, é presentado o refletograma (ou ecograma) global (considerando toda a gama audível) para os primeiros 200 ms, após a emissão do sinal impulsivo (neste caso através da técnica de correlação MLS), para uma emissão omnidirecional num dos lados da frente de palco (F1, correspondente ao lado direito) e um recetor na zona central da frente de palco (R1). No gráfico da direita desta Figura, é presentado um refletograma parcial correspondente à banda de oitava de 500 Hz, onde aparece de forma evidente uma das principais reflexões da sala, sensivelmente 70 ms após a receção do som direto. Se for considerada uma velocidade de propagação do som no ar de 344 m/s, este desfaseamento de 70 ms corresponde a uma diferença de trajetória de 24 m, que coincide precisamente com a diferença de trajetória entre uma reflexão de 2ª ordem, entre a guarda da frente do balcão e o teto da frente sala, e o som direto (conforme esquema indicado também nesta Figura).

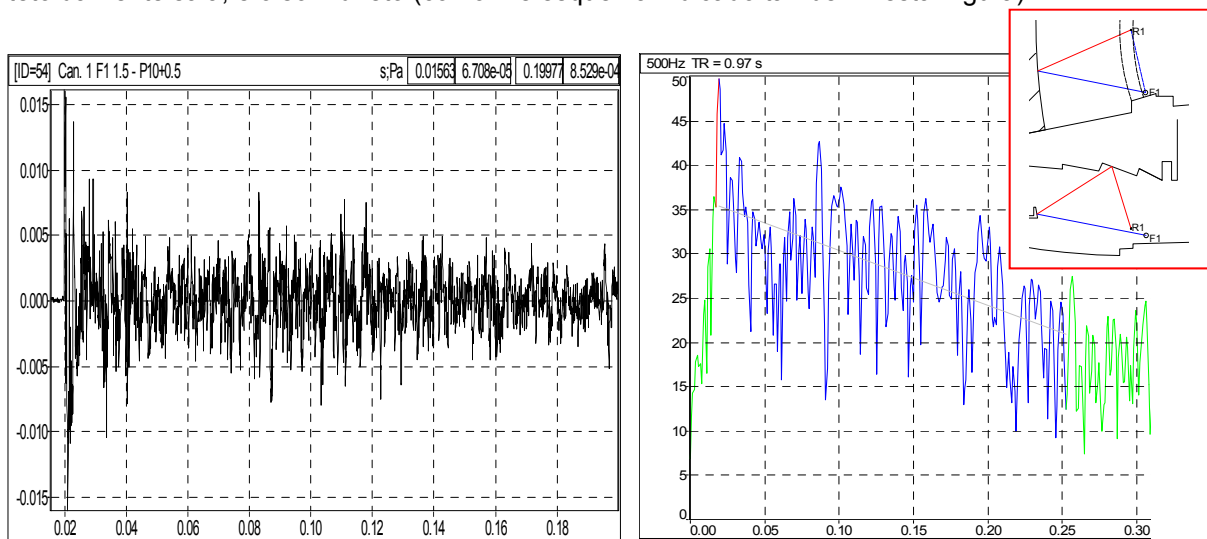


Figura 2 – Refletograma com a curva de decaimento (global e parcial para a oitava de 500Hz), obtido no ponto R1 para a fonte na posição F1 (antes das obras de correção).

Na Figura 3 são apresentados os resultados médios, para a plateia e balcão, dos tempos de reverberação, do índice RASTI e da definição sonora ($D_{500,2000}$), considerando a fonte na posição F1 para o recetor R1 e a posição F2 para os restantes recetores.

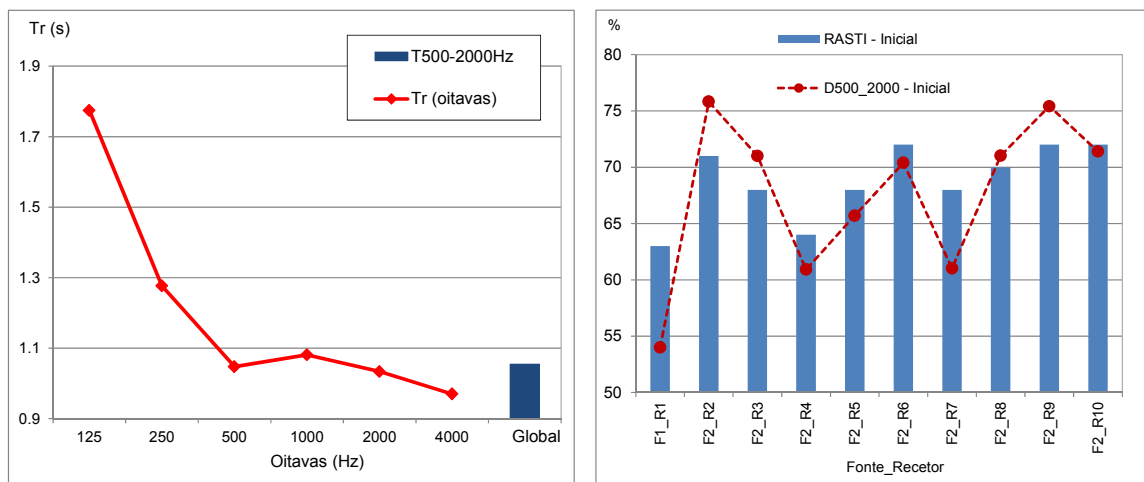


Figura 3 - Resultados médios dos tempos de reverberação na sala (plateia e balcão) e do índice RASTI e da definição sonora ($D_{500,2000}$), medidos no teatro em estudo antes das obras de correção.

Apesar dos resultados obtidos não evidenciarem insuficiências acústicas para a generalidade dos pontos da plateia e balcão, é possível detetar algumas insuficiências ao nível do palco, relacionadas sobretudo com a falta de absorção sonora do palco em baixas frequências e com reflexões de significativo atraso (ecos), em particular as originadas pela combinação da faixa de parede da guarda do balcão com os painéis de teto inclinados, localizados sobre a frente de palco.

Face às insuficiências acústicas ao nível do palco, foram propostos dois tipos de soluções de correção: uma correção pontual ao nível da faixa de parede inclinada que constitui a guarda do balcão; e uma correção do revestimento da envolvente interior do palco. Em ambos os casos foram propostas soluções de revestimento fonoabsorvente, ainda que com características distintas, mas no caso do palco, por se considerar menos relevante e por corresponder a uma intervenção mais intrusiva e mais dispendiosa, optou-se pela correção apenas ao nível da guarda do balcão. Uma vez que se pretendia manter a mesma imagem desta faixa de parede, com um aspeto liso e de cor clara, foi proposto, e posteriormente executado, um revestimento fonoabsorvente microporoso constituído por uma camada rígida de lã mineral com cerca de 6 cm de espessura, colada à faixa de parede existente, e um acabamento delgado, aplicado em obra, do tipo “BASWaphon”.

4. AVALIAÇÃO ACÚSTICA FINAL

Após a execução da solução de correção indicada no ponto anterior, foi efetuada nova campanha de ensaios acústicos, sensivelmente nas mesmas condições das indicadas no ponto anterior (para a situação inicial), tendo sido utilizado também o sistema eletroacústico da sala e a fonte omnidirecional. Contudo, o grau de amplificação utilizado nesta campanha final foi um pouco superior, o que permitiu condições de decaimento mais favoráveis.

Na Figura 4 são apresentados os refletogramas (global e para a oitava de 500 Hz), obtida em condições idênticas aos da Figura 2, mas após as obras de correção, onde, apesar de se manterem evidentes as inúmeras reflexões no palco, já não é perceptível a reflexão de 2ª ordem na faixa de parede do balcão e no teto da frente de palco.

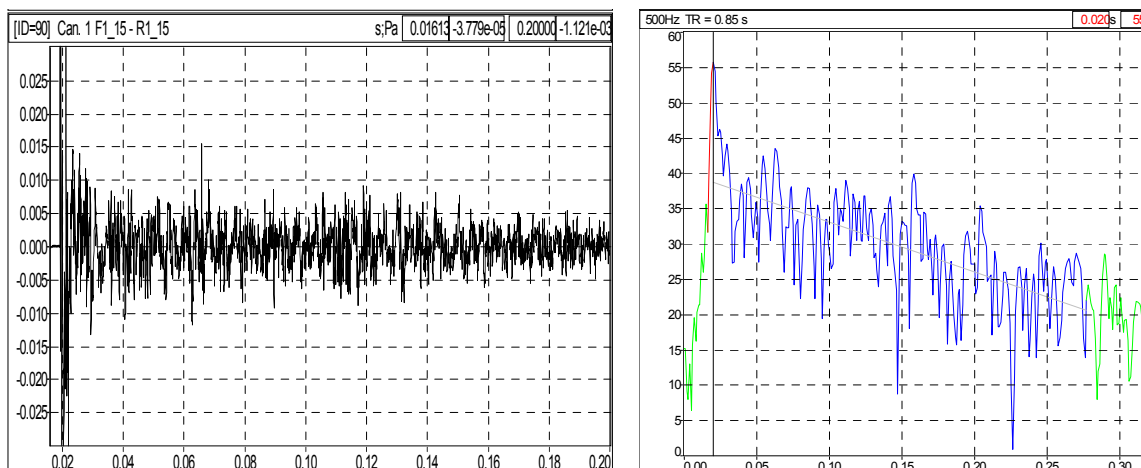


Figura 4 - Refletogramas com as curvas de decaimento (global e para a oitava de 500 Hz), obtido no ponto R1 para a fonte na posição F1, para os primeiros 200 ms (depois das obras de correção).

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados médios, para a plateia e balcão, dos tempos de reverberação, do índice RASTI e da definição sonora ($D_{500,2000}$), com fonte omnidirecional na posição F2,

para a generalidade dos pontos, e em F1, para o recetor R1, e com o próprio sistema electroacústico da sala, bem como o índice C_{80} (com fonte omnidirecional em F2). Não existe praticamente alteração do tempo de reverberação na sala. De uma forma geral, para a generalidade dos pontos da plateia e balcão não existem alterações significativas nos resultados obtidos, antes e após as obras de correção. As maiores diferenças, e como seria de esperar, ocorreram ao nível do palco (posições R1 e R2), onde é possível detetar melhorias significativas.

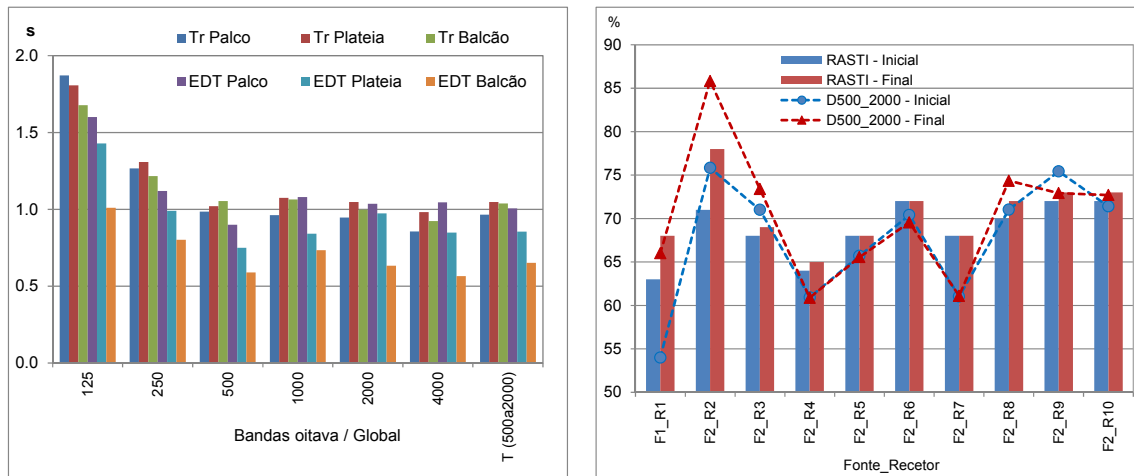


Figura 5 - Resultados médios dos tempos de reverberação, à esquerda, e do índice RASTI e da definição sonora (D_{500_2000}), à direita, medidos antes e após as obras de correção (com fonte omnidirecional).

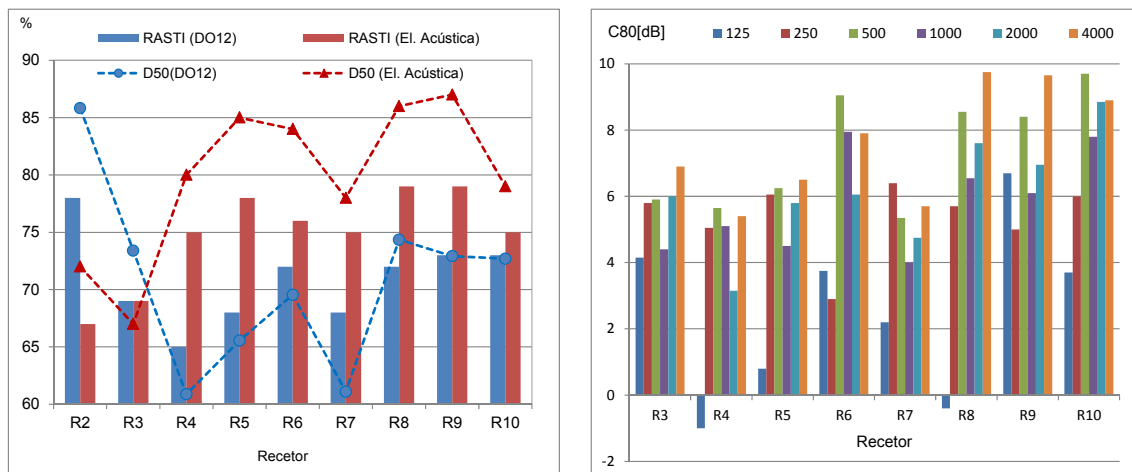


Figura 6 – Resultados do índice RASTI e da definição (D_{500_2000}), com fonte omnidirecional na posição F2 e com o sistema electroacústico (à esquerda) e índice C_{80} com fonte omnidirecional em F2 (à direita).

Na Figura 7 são apresentadas as variações dos níveis sonoros, em bandas de oitava e o valor global em dB(A), para um espectro do tipo “ruído branco”, entre o ponto R3 (central da 1ª fila) e os restantes pontos da sala, com fonte omnidirecional na posição F2 (resultados à esquerda desta Figura) e com o sistema electroacústico da sala (resultados à direita desta Figura). Apesar de se verificar uma variação significativa em frequência do campo sonoro ao longo dos vários pontos da plateia e balcão, em particular quando se utiliza o próprio sistema electroacústico da sala, a variação do valor de L_{Aeq} é relativamente pequena, não ultrapassando os 3 dB(A) com a fonte omnidirecional e os 6 dB(A), entre pontos extremos (entre R5 e R10), no caso da

utilização do sistema eletroacústico. Estas diferenças indiciam que é possível introduzir melhorias significativas caso se implementem melhorias no sistema eletroacústico, nomeadamente através do reposicionamento mais favorável das colunas de som e num maior equilíbrio da equalização e amplificação sonora.

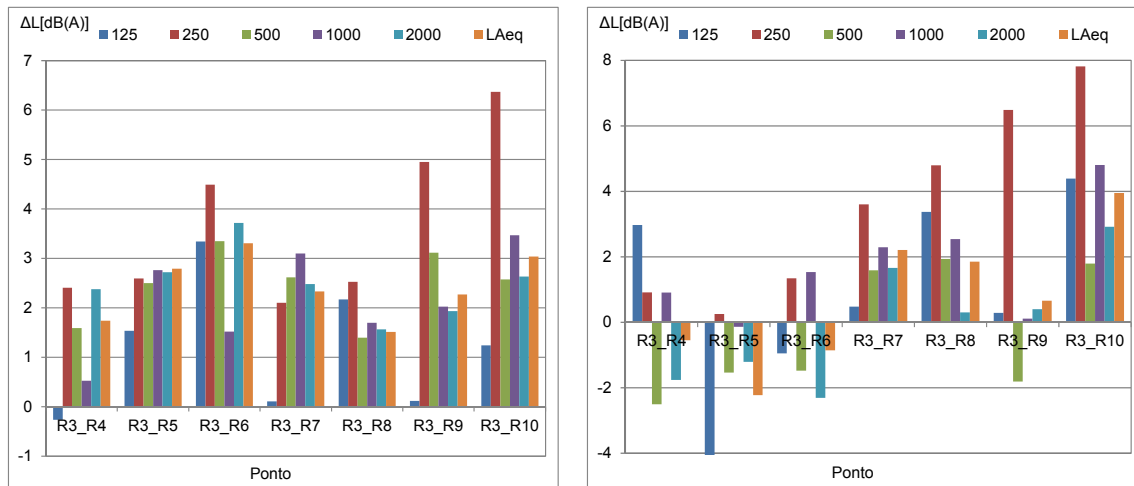


Figura 7 – Variação dos níveis sonoros em bandas de oitava e valor global em dB(A) entre o ponto R3 (central da 1ª fila) e os restantes pontos da sala, com fonte omnidirecional na posição F2 (à esquerda) e com o sistema eletroacústico da sala (à direita).

5. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentada uma síntese de um estudo de condicionamento acústico de um teatro de grandes dimensões, e com insuficiências acústicas essencialmente ao nível do palco, onde foram introduzidas correções muito localizadas, que permitiram melhorias significativas ao nível do palco. Com este estudo pretende-se evidenciar, mais uma vez, que por vezes pequenas “defeitos acústicos” podem condicionar fortemente a qualidade sonora de um espaço. Neste caso, as insuficiências ocorriam ao nível do palco e não diretamente nos espetadores, mas, como é evidente, situando-se ao nível do palco poderiam colocar em causa a qualidade sonora do espetáculo.

REFERÊNCIAS

- [1] Isbert, A. C., Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Edicions UPC, Universidade Politècnica de Catalunya, 1998.
- [2] ISO 3382-1:2009. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces.
- [3] ISO 3382-2:2008. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [4] Kuttruff, H., Room Acoustics, Elsevier Science Publishers, New York, 1991.
- [5] Beranek, L. L., *Concert and Opera Halls – How They Sound*, Acoustical Society of America, New York, 1996.
- [6] RRAE – *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, com a nova redação dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.
- [7] Arau-Puchades, H., Es el criterio acustico el paradigm de la excelencia Acústica en el diseno de salas?, *Acústica 2008*, 20 - 22 de Outubro, Coimbra, 2008.