

# 1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Num recinto fechado, quando se produz um sinal acústico, este ouve-se ainda depois da fonte sonora se ter extinto, isto é, ouve-se mais tempo do que dura. Este fenómeno chama-se “reverberação” e é devido a sermos atingidos não só pela onda direta como pelas inúmeras reflexões nas superfícies de sala, e que chegam em instantes diferentes.

São duas, as vias de propagação do som até ao ouvinte: via direta e via refletida (a onda é refletida pelas superfícies do teto e paredes ou por reflexões múltiplas). As reflexões múltiplas (chega a haver várias centenas de reflexões para uma onda) são combinações desses processos.

O tempo de reverberação de um recinto é, por definição, o tempo que o nível de intensidade de um som demora a diminuir 60 dB depois da fonte sonora se ter extinto. Note-se que essa redução de 60 dB corresponde a uma diminuição da energia igual a um milhão de vezes. Isto corresponde a um decréscimo da pressão sonora de um valor de 1000.

Num espaço desportivo de superfícies com coeficientes de absorção sonora reduzidos, o tempo de reverberação é relativamente longo, enquanto numa câmara anecóica onde todas as paredes, o teto e o pavimento são revestidos por um material altamente absorvente, o tempo de reverberação é quase zero. A absorção de diferentes materiais varia muito com a frequência do som, incidência e do ângulo de incidência. Por isso o tempo de reverberação varia também com a frequência do som. Geralmente, o tempo de reverberação é maior em frequências baixas porque estas são usualmente menos eficazmente absorvidas do que as frequências elevadas. A maior parte dos materiais absorve melhor as altas frequências.

É importante que o tempo de reverberação sirva o objetivo de utilização do espaço desportivo. Um tempo de reverberação longo origina um discurso menos perceptível e música menos clara e produz níveis sonoros mais elevados de ruído existente. Um tempo de reverberação curto reduz o ruído existente, torna as sílabas/palavras perceptíveis e torna a música mais clara.

Os tempos de reverberação refletem o desempenho acústico das instalações desportivas, daí ser importante a sua medição e o seu controlo. Para medir o

tempo de reverberação é necessário uma fonte sonora que emita som dentro de um espaço e um recetor para monitorar o decréscimo do nível da pressão do som, após o término da emissão da fonte sonora. O ruído pode ser transmitido como um som estável que depois é cortado (altifalante), ou como um impulso curto (pistola) (Brüel e Kjaer, 1988).

Para a Brüel e Kjaer (1988) a pistola de partida é uma fonte sonora prática, mas falta-lhe energia nas regiões de baixas frequências e reprodutividade. Um método preferível consiste no uso de um altifalante a emitir ruído em bandas de frequência. Para um determinado amplificador de energia, este método permite que se transmita mais energia para a instalação do que a pistola (importante quando altos níveis de ruído de fundo estão presentes).

Devido à habitual presença de ruído de fundo no interior da sala em estudo raramente é possível medir o decréscimo total de 60 dB no ruído de teste. Desta forma, usa-se 30 dB ou 20 dB de decréscimo, extrapolando depois os resultados para os 60 dB.

Uma secção de receção típica pode consistir num avaliador do nível de som, equipado com dispositivo de filtro de uma oitava ou 1/3 oitava.

Um filtro centrado na mesma frequência que o filtro da secção da transmissão reduz a influência do ruído de fundo. Desde que a reverberação decresça de uma forma exponencial e seja gravada numa escala logarítmica, o decréscimo irá ser uma linha reta na folha de registo. O resultado do tempo de reverberação (para uma determinada banda de frequência) é estimado diretamente do registo (Brüel e Kjaer 1988).

A aparência descontinuada dos decréscimos a frequências baixas deve-se à distribuição desequilibrada dos modos próprios da sala nestas frequências.

Quando o método do impulso para a transmissão do ruído é usado, os resultados do gráfico representam a “resposta do impulso” da sala e o tempo de reverberação não pode ser obtido diretamente do decréscimo. Ao usar o *software* apropriado, é possível calcular os resultados do tempo de reverberação pela “resposta do impulso” e obter-se resultados precisos e reproduzíveis mais rapidamente do que com o método do som estável que depois é cortado (Brüel e Kjaer 1988).

Para Pinto *et al.* (2002) a medição do tempo de reverberação pode ser feita recorrendo a uma fonte sonora (tipo 4224 – Brüel & Kjaer) que emite um ruído

cujo sinal é coordenado pelo sonómetro. Estas medições podem ser efetuadas em três posições no interior de cada instalação quando estas se encontram em tempos mortos (sem aulas). Torna-se então possível obter um valor médio de TR na instalação em estudo.

A medição do volume do espaço deve ser feita pois é um dado essencial quando se pretende caracterizar a reverberação do espaço em função de um tempo de reverberação ideal.

Começam a aparecer estudos que referem qual o TR adequado para cada volume.

Isbert (1998) para volumes entre 1000 e 100.000 m<sup>3</sup> recomenda um TR para recintos de uso desportivo, que oscila entre 1 e 3 s. Para volumes de 1000 m<sup>3</sup> a sua recomendação é de um TR de 1 s. Este autor reforça ainda que a inteligibilidade em todos os pontos do recinto ocupado deve obter o valor de RASTI  $\geq 50$  (mínimo aceitável).

Nijs e Schuur (2003) referem que na Holanda um TR de 1,8 s é usado como regra para um bom conforto acústico, num pavilhão desportivo. No entanto, no estudo por eles realizado a dificuldade surgiu devido ao grande volume do pavilhão impedindo a obtenção de um TR ideal de 1,8 s alcançando somente um TR de 2,3s (5000 m<sup>3</sup>), o TR não deve exceder os 1,5s.

Já Hamayon (2006) salienta que para pavilhões com 10000 m<sup>3</sup> de volume a duração do TR deverá ser de 2 a 2,2 s baseando esta recomendação na norma francesa NF P90-207.

Zamarreño et al. (2011) propõem-se realizar um projeto de um pavilhão polidesportivo coberto, com o respetivo planeamento acústico térmico e visual, a fim de tornar a instalação desportiva num espaço confortável. Assim, para um pavilhão com um volume de 12900 m<sup>3</sup> determinaram um TR de 2,1 s considerando um RASTI aceitável entre 0,45 e 0,60.

Na mesma linha de pensamento, Wroblewska (2010) indica que para salas de desporto com volume igual a 5600 m<sup>3</sup>, os valores de TR deveriam ser de 1,5 s (de acordo com a norma BB93:2000, Building Bulletin England), 1,82 s (de acordo com a norma DIN 18041:2004, Germany) e 2,27 s (SN 520181:2004, Switzerland).

Neste contexto, mas numa perspetiva nacional já começam a aparecer trabalhos de investigação decorrentes deste estudo. Foi realizado um trabalho

sobre cinco Centros de Condição Física (Pinto *et al.* 2002) referente aos tempos de reverberação e exposição pessoal ao ruído. A autora concluiu que o tempo de reverberação deve ser de  $\leq 1,5$  s para os ginásios.

Indo de encontro ao referido anteriormente apareceu um estudo em Portugal realizado por Conceição (2009). O autor selecionou uma escola e avaliou as aulas de educação física, mais especificamente, avaliou a exposição ocupacional ao ruído e a capacidade auditiva nos professores de Educação Física. Concluiu que, o valor médio de TR de 3,8 s é um valor considerado elevado uma vez que o autor estipula como conforto 1,5 s.

### **1.1. RECOMENDAÇÕES E DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES**

Cada vez mais os utentes são prejudicados pelos níveis de ruído a que estão sujeitos nas instalações desportivas, por vezes inconscientes da nocividade dessa exposição sonora, sofrem diariamente de consequências fisiológicas, psicológicas e principalmente, de uma perda gradual da capacidade auditiva. Surge a necessidade de quantificar e estabelecer critérios que permitam avaliar se as pessoas estão realmente sujeitas a incomodidades criando-se, assim, condições para solucionar e/ou prevenir estas situações, estabelecendo esses critérios.

A acústica tornou-se um requisito especial de qualidade da construção de Instalações Desportivas visto que o conforto acústico contribui para o bem-estar e saúde dos utentes.

Após verificada a importância da qualidade da acústica existe a necessidade de regulamentar os requisitos acústicos dos edifícios, aparecendo o Decreto-Lei n.º 96/2008, 9 de Junho (que substitui o Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio), que vem contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações. As determinações do referido Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) aplicam-se aos seguintes tipos de edifícios (artigo 1º, n.º 2), em função dos usos a que os mesmos se destinam: Edifícios habitacionais e mistos; Edifícios comerciais, industriais ou de serviços; Edifícios escolares e de investigação; Edifícios hospitalares; Recintos desportivos e Estações de transporte de passageiros.

O “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios” (artigo 2º) define e utiliza entre outros, o parâmetro TR como sendo importante para caracterizar as situações no âmbito da Acústica.

d) Tempo de reverberação, T – (Intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milésimo do seu valor inicial).

Segundo o Artigo 7.º do RRAE a construção de edifícios que se destinem a usos desportivos deve cumprir unicamente o requisito acústico referente ao tempo de reverberação. No interior dos recintos desportivos, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, T, correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deverá satisfazer as condições seguintes (nas quais V se refere ao volume interior do recinto em causa):

$$i) T_{500 \text{ Hz}-2 \text{ kHz}} \leq 0,15V^{1/3};$$

$$ii) T_{500 \text{ Hz}-2 \text{ kHz}} \leq 0,12V^{1/3} \text{ (se os espaços foram dotados de sistema de difusão pública de mensagens sonoras).}$$

A determinação do tempo de reverberação deve ser efetuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional. Nas avaliações *in situ* destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I, associado à determinação das grandezas em causa (de 25% do valor regulamentar para T).

O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando verificar a seguinte condição: o valor obtido para o tempo de reverberação, T, diminuído do fator I (I=25% do limite regulamentar), satisfaz o limite regulamentar.

O tempo de reverberação dos sons na sala deverá ser o mais curto possível. Recomenda-se que em atividades como a dança aeróbica, sociais, tradicionais e afins, onde a música é utilizada conjuntamente com a voz, o tempo de reverberação seja reduzido. Segundo Sena (1987), o TR deverá estar entre 1,2 e 2,0 s.

Segundo o IND (s/d) os requisitos acústicos para salas de desporto são os seguintes: a propagação da reverberação deve ser contida, através da configuração e utilização de materiais apropriados, de modo que a duração da reverberação não ultrapasse os 3 s para frequências baixas (125 – 250 Hz) e 2 s para médias frequências (500 – 1000 Hz).

Para a DGD (1987) o tempo de reverberação dos sons na sala deverá ser o mais curto possível, entre 1,2 e 2,0 s. A IAKS (s/d) corrobora com os autores referidos anteriormente, quando menciona que o tempo de reverberação da sala deve ser mantido o mais curto possível, situando-se entre 1,2 a 2,2 s. Para este tipo de atividades, deve-se procurar atingir o mínimo de tempo de reverberação possível, quanto mais pequena a sala, menor deve ser o tempo de reverberação.

A norma francesa NF90 – 207 (1986), como se pode verificar no quadro 1.4, refere relativamente à acústica nas salas desportivas que, o isolamento normalizado do ruído em locais reservados às atividades desportivas, deverá ser superior a 30 dB(A). Refere ainda que a duração do tempo de reverberação de uma sala desportiva deve estar compreendida entre os valores de 1,2 e 3,2 s (para 125 Hz a 4000 Hz). Quanto aos equipamentos de aquecimento e climatização o nível sonoro do ruído deve ser inferior ou igual a 45 dB(A).

A norma francesa refere que em instalações desportivas não tratadas, a duração do tempo de reverberação pode estar compreendida entre 3 a 5 s para um volume de 2000 m<sup>3</sup> e entre 5 a 10 s para um volume de 12000 m<sup>3</sup>. Nestes dois casos, a comunicação verbal necessária para instruções ou para o ensino torna-se difícil, senão mesmo impossível, o que não se adequa aos Parques Desportivos Escolares.

No Quadro 1.1 apresenta-se um resumo dos valores limites referentes aos parâmetros acústicos.

Quadro 1.1- Valores do tempo de reverberação calculados em função do volume (NF 90 – 207 de 1986).

<b>VOLUME (m<sup>3</sup>)</b>	500	1000	2000	4000	6000	8000	10000	12000
<b>TR máx. (s)</b>	1,1	1,4	1,8	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2

Por forma a facilitar a informação referente à legislação em vigor, recomendações e normas, indica-se no Quadro 1.2 um resumo dos valores limite para os níveis sonoros e tempo de reverberação.

Quadro 1.2 – Resumo dos valores limite para os Níveis Sonoros (dBA) e Tempos de Reverberação segundo várias entidades

ENTIDADE	Nível de acção (dBA)	Valor limite (dBA)	Tempo de Reverberação (s)
Decreto-Lei n.º 182/2006 de 6 de Setembro	80 Inferior 85 Superior	87	-
RRAE (2008)	-	-	$T_{500\text{ Hz}-2\text{ kHz}} \leq 0,15V^{1/3}$ $T_{500\text{ Hz}-2\text{ kHz}} \leq 0,12V^{1/3}$
<i>American College of Sports Medicine</i> (1997)	70 a 80	90	$0,8 \leq TR \leq 1,4$
IND (s/d)	-	-	125-250 Hz, $TR < 3$ 500-1000 Hz, $TR = 2$
DGD (1987)	-	-	$1,2 \leq TR \leq 2,0$
Sena (1987)	-	-	$1,2 \leq TR \leq 2,0$
IAKS (s/d)	-	-	$1,2 \leq TR \leq 2,2$
NF90-207 (1986)	-	-	500-2000 Hz $1,1 \leq TR \leq 1,8$ 4000-8000 Hz $2,2 \leq TR \leq 2,8$

Conclui-se, após todas as referências e estudos apresentados nesta pesquisa, que o nível sonoro máximo de 80 dB(A) e o tempo de reverberação máximo de 1,5 s são os aceitáveis para este tipo de instalações desportivas. Considera-se igualmente valores de ruído de fundo inferiores a 40 dB(A) e um RASTI superior a 0,45, recomendações plausíveis para se adquirir conforto acústico neste tipo de instalações. Se as Instalações Desportivas estiverem bem construídas, com adequados materiais de isolamento sonoro e correções acústicas, ou seja, apresentem uma “boa acústica”, o nível sonoro, ruído de fundo, tempo de reverberação e o RASTI (inteligibilidade da palavra) raramente se tornarão um problema.

## 1.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS

O conforto acústico das Instalações Desportivas depende não só do ruído mas também do comportamento acústico dos espaços em questão.

Para caracterizar acusticamente as Instalações Desportivas devem ser utilizados equipamentos de medição específicos para cada situação a analisar. Os aparelhos de medição através de relações energéticas ou temporais do sinal recolhido no local permitem obter e registar os parâmetros acústicos necessários à caracterização dos diferentes espaços desportivos.

Tempo de reverberação ( $TR$ ) é o intervalo de tempo em segundos, que um som demora a extinguir-se num espaço, após múltiplas reflexões. Teoricamente é, por definição, o tempo que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB, desde a cessação da emissão da fonte sonora.

No entanto, devido a limitações nos equipamentos de medição e ruído ambiente, este parâmetro é usualmente obtido com base em decaimentos de 20 ou 30 dB (designados de T20 ou T30) e depois é feita uma extrapolação correspondente a um decaimento de 60 dB (T60). A utilização de filtros de bandas de frequência normalizadas permite discriminar o tempo de reverberação para essas frequências simultaneamente. O tempo de reverberação num determinado local varia geralmente na ordem inversa da inteligibilidade da palavra e está intimamente ligado à geometria e à absorção sonora do espaço em análise. Um dos efeitos mais importantes de um local com um tempo de reverberação desadequado é a redução da inteligibilidade da palavra nesse recinto. Tal deve-se a que as consoantes, devido ao seu baixo nível sonoro de emissão e ao seu curto período de duração, são suplantadas pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes (que são emitidas a nível mais elevado e com maior duração). Para se obterem resultados fiáveis para o  $TR$ , devem efetuar-se várias medições no mesmo ponto e repetir a operação em vários pontos do local em estudo. Os valores ideais para o tempo de reverberação de um determinado local dependem fundamentalmente da utilização que se pretende dar a esse espaço.

### **1.2.1. PROCESSO DE MEDIÇÃO**

As avaliações do Tempo de Reverberação ( $TR$ ) devem ser realizadas sem ocupação, ou seja, no espaço desportivo, não deve estar ninguém para além do operador. Os procedimentos devem ser sempre os mesmos em todos os espaços desportivos, ou tentar seguir sempre o mesmo protocolo.

O TR é medido com o auxílio de um sonómetro (Figura 1.1). O sonómetro é um instrumento que converte as variações de pressão atmosférica em níveis de pressão sonora, recorre-se a uma fonte sonora (*Brüel & Kjaer* - tipo 4224, Figura 1.2) que emite um ruído rosa cujo sinal é coordenado pelo sonómetro.



Figura 1.1– Sonómetro B&K 2260  
[Fotografia da autora]



Figura 1.2– Fonte sonora B&K 4224  
[Fotografia da autora]

Cada medição normalmente é realizada à altura de aproximadamente 1,30 m. A fonte sonora emite um ruído com características aproximadas de ruído rosa, durante 10 segundos. Após cessar o ruído emitido pela fonte sonora e em simultâneo, o sonómetro regista o nível de pressão sonora recebido em cada instante, no ponto a avaliar e determina o correspondente tempo de decaimento relativamente a 30 dB (T30), nas bandas de frequência de oitava, dos 125 aos 4000 Hz.

Devem seguir-se as recomendações da norma EN ISO 3382:1997 avaliando três pontos no recinto, cada um dos quais duas vezes, para garantir fiabilidade. O sonómetro, que é colocado em cada um dos pontos escolhidos previamente, regista as diferenças entre o nível de pressão sonora ao longo do tempo de medição e calcula em seguida o tempo de decaimento correspondente a 20 dB e 30 dB, fazendo depois a extrapolação para o valor de 60 dB (T20 e T30), para as bandas de frequência de oitava ou terço de oitava.

Este tipo de avaliação tem que ser realizada com os espaços vazios, devido ao intenso ruído que a fonte sonora emite, o que obriga ao uso de proteção auditiva. Para além disso, não pode existir nenhum outro tipo de ruído na

instalação, de forma a verificar quanto tempo demora o ruído a decair, caso contrário iria afetar os dados.

As medições dos tempos de reverberação ( $TR$ ) são efetuadas através da média de duas posições pré-definidas localizadas de igual forma, sendo estas utilizadas em três pontos, dois situados nas extremidades da instalação desportiva e um situado no centro, contando com a presença de uma ou duas pessoas, tornando-se então possível obter um valor médio de  $TR$  dos espaços. Na Figura 1.3 esquematiza-se a localização da fonte sonora (FS) e distribuição dos pontos de medição. Este parâmetro acústico é medido nas frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, no entanto os dados usados podem ser somente referentes ao valor médio, nas bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz, pois estas são as bandas de frequências onde existiam melhores correlações entre parâmetros e também devido ao facto de a média de valores obtidos nestas bandas de frequências serem mais representativas e usadas na legislação (RRAE). A medição do volume do espaço em análise deve preceder as medições do  $TR$ , pois o volume é um dado essencial quando se pretende avaliar a reverberação do espaço em função de um tempo de reverberação ideal (ou analisar o cumprimento da atual legislação).

A fonte sonora (FS) deve ser colocada no eixo central da instalação desportiva relativamente ao comprimento da sala, apontando para o fundo da sala (Figura 1.3). As medições podem ser realizadas em três posições diferentes conforme se pode ver em planta na Figura 1.3. Em cada posição, efetuam-se duas leituras, rodando entre cada leitura, a direção do microfone do sonómetro de aproximadamente um ângulo de  $30^\circ$  com o eixo da sala.

Deste modo, o valor final relativo a cada ponto de medição corresponde à média aritmética de duas leituras de tempo de reverberação em cada posição.

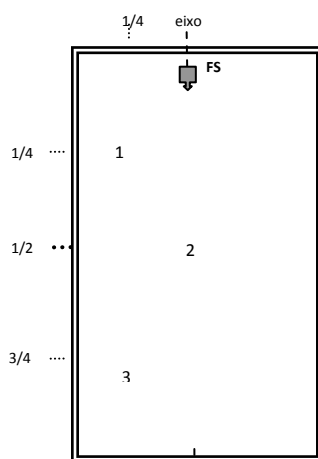


Figura 1.3 – Localização dos pontos de medição e da fonte sonora (FS) nos pavilhões para a determinação do parâmetro Tempo de Reverberação (TR).

### 1.2.2. EXEMPLO NA APLICAÇÃO

Os valores apresentados indicam a capacidade de absorção que os espaços têm inicialmente para um dado volume e com os valores reais dos tempos de reverberação obtidos. Posteriormente calcula-se o valor do alfa que deveria existir, ou seja a absorção, que deveria existir para obter um TR de acordo com a legislação e finalmente obtém-se o valor de absorção que efetivamente falta para que o espaço desportivo venha a adquirir o conforto acústico pretendido. O Quadro 1.3 apresenta um exemplo de calcular qual o TR adequado para qualquer instalação e como se poderá aplicá-lo em casos práticos.

Quadro 1.3– Exemplo de requalificação de um pavilhão e uma sala de desporto

	PAVILHÃO	SALA DE DESPORTO
VOLUME (m <sup>3</sup> )	4694	1486
ÁREA DA INSTALAÇÃO (m <sup>2</sup> )	553	231
TR (S) 500, 1000, 2000 HZ	5,1	2,6
TR (S) RRAE	2,5	1,7
ABSORÇÃO INICIAL PREVISTA (m <sup>2</sup> )	148	91
ABSORÇÃO QUE DEVERIA EXISTIR (m <sup>2</sup> )	299	139
ÁREA INTERIOR DA INSTALAÇÃO A REVESTIR (m <sup>2</sup> )	151	48

Ao observar o Quadro 1.3 verifica-se que se obteve um TR de 5,1 s. Segundo o Decreto-Lei n.º 96/2008 (RRAE), o TR para este volume (4694 m<sup>3</sup>) deveria ser no máximo 2,5 s. A absorção inicial previsível (fórmula de Sabine) no pavilhão

é de  $148 \text{ m}^2$ , a que deveria existir seria  $299 \text{ m}^2$ , o que significa que faltam  $151 \text{ m}^2$  de absorção para se poder obter o conforto acústico mínimo desejado. Logo, sugere-se acrescentar  $151 \text{ m}^2$  de material absorvente ao pavilhão, que pode ser distribuído pelas paredes ou pela cobertura. A título de exemplo pode ser colocado na cobertura material absorvente sonoro com acréscimo de  $\alpha$  de 0,27. Considerando o TR recomendado neste estudo (1,5 s), a área de material absorvente mínima teria de ser de  $501 \text{ m}^2$ , ou seja, teria de ser revestida quase a totalidade da área (cobertura) da instalação desportiva.

No que diz respeito à sala de desporto, verifica-se que se obteve um TR de 2,6 s. Segundo o Decreto-Lei n.º 96/2008 (RRAE), o TR para este volume ( $1486 \text{ m}^3$ ) deveria ser de 1,7 s. A absorção sonora inicial no pavilhão é de  $91 \text{ m}^2$ , a que deveria existir seria  $139 \text{ m}^2$ , o que significa que faltam  $48 \text{ m}^2$  de absorção para se poder obter o conforto acústico desejado. Logo, bastava cobrir homogeneamente uma área de  $48 \text{ m}^2$  da sala de desporto, distribuída pelas paredes ou pela cobertura. A optar pela cobertura teria de se ter uma percentagem de revestimento de 21% da área da instalação ( $231 \text{ m}^2$ ). Considerando o TR recomendado neste estudo (1,5 s), a área a revestir de material absorvente teria de ser  $159 \text{ m}^2$ .

Esta seria uma das soluções para conseguir o conforto acústico desejado no nestes espaços desportivos.