



David Miguel Freire Tadeu

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA ENSAIOS DE PERCUSSÃO EM PAVIMENTOS INCLUINDO BAIXAS FREQUÊNCIAS: ABORDAGEM LABORATORIAL

COMPARISON OF METHODOLOGIES FOR IMPACT SOUND TESTS IN FLOORS INCLUDING LOW FREQUENCIES: LABORATORY APPROACH

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano orientada pela Professora Doutora Julieta António

Coimbra, 02 de Abril de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

David Miguel Freire Tadeu

Comparação de metodologias para ensaios de percussão em pavimentos incluindo baixas frequências: abordagem laboratorial

Comparison of methodologies for impact sound tests in floors including low frequencies: laboratory approach

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano orientada pela Professora Doutora Julieta António

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Coimbra, 02 de Abril de 2018

Agradecimentos

Dedico este trabalho à minha mulher, que tanto me apoiou nesta nova etapa e neste novo projeto.

Deixo ainda palavras de grande apreço a todos aqueles que me apoiaram, com especial destaque para os meus avós, pois sem eles não estaria onde estou hoje.

Por fim deixo uma palavra de agradecimento à Professora Julieta António por toda a disponibilidade e pela incansável ajuda durante todo este processo. E ainda ao ITeCons pela disponibilidade do espaço, equipamentos e materiais utilizados para a realização deste trabalho.

Resumo

As fontes sonoras de percussão nos edifícios existem cada vez em maior número, e manifestam-se tanto no interior como no exterior destes. Estas fontes incluem o simples ato de caminhar no interior das habitações, ou de crianças a saltar, e os equipamentos que fazem parte do quotidiano, como máquinas de lavar loiça e roupa, equipamentos de desporto pessoal e ainda a queda de objetos, entre muitas outras.

Como seria de prever surge aliada ao aumento do número de fontes a necessidade de projetos acústicos cada vez mais criteriosos no que diz respeito às escolhas dos materiais e das soluções construtivas a adotar.

Tendo essa preocupação em mente o mercado apresenta leques de materiais cada vez mais alargados, devidamente caracterizados em laboratórios com a adequada acreditação para o efeito. No entanto, os ensaios de caracterização acústica de uma solução construtiva exigem, seguindo as indicações das normas da série ISO 10140, uma gama de frequências que inicia, no mínimo, na banda de um terço de oitava de 100 Hz e termina na banda de um terço de oitava de 5000 Hz. As normas sugerem ainda métodos e fontes alternativas para a medição e cálculo de isolamento nas baixas frequências, como a máquina de percussão modificada e a bola de impacto.

Neste âmbito, foi realizado um estudo em que se utilizaram as fontes de impacto sugeridas pelas normas ISO 10140 em diferentes soluções construtivas de pavimentos, nomeadamente com diferentes lajes de suporte e diferentes soluções de reforço acústico. Pretendeu-se verificar como variam os níveis sonoros gerados por cada fonte em cada solução construtiva. Realizou-se, ainda, a comparação entre as fontes sugeridas pelas normas, com uma fonte alternativa, que se pretendia que representasse um tipo de ruído gerado pela atividade humana no interior de uma habitação.

Palavras-chave: isolamento a sons de percussão; baixas frequências; fontes de percussão alternativas; máquina de percussão normalizada; máquina de percussão modificada; bola de impacto; atividade humana; metodologias de ensaios.

Abstract

The number of impact noise sources in buildings is increasing and becoming more relevant, both inside and outside of buildings. These may include people's footsteps, children playing, or the regular operation of home appliances such as dishwashers, washing machines, home exercise equipment and falling objects, among many others.

Not surprisingly, there is a growing need for building acoustics projects that are carefully thought out regarding choice of building materials and building systems.

In response to this concern, there is an increasing range of products available in the market which are being characterized in accredited laboratories. However, according to the ISO 10140 standards, acoustic characterization tests of building systems require a frequency range starting, at least, in the 100 Hz one-third-octave band, and ending in the 5000 Hz one-third-octave band. Furthermore, the standards also suggest alternative methods and sources for measuring and determining insulation in the low frequencies, such as using the modified impact machine or the impact ball.

In this context, a study was carried out using the impact sources suggested by the ISO 10140 series in different floor solutions. Several support slabs and different acoustic reinforcement solutions were studied. The aim was to evaluate the variation of the noise levels generated by each source in each constructive solution. Furthermore, the sources suggested by the standards were compared to an alternative source intended to simulate the noise generated by human activity inside a home.

Keywords: impact sound insulation; low frequencies; alternative impact sources; standard impact machine; modified impact machine; impact ball; human activity; tests methodologies.

Índice

Agradecimentos	2
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do documento	3
2 Ruídos de Percussão.....	4
2.1 Efeito do som de baixa frequência no ser humano	5
2.2 Enquadramento legal e normativo	8
2.3 Fontes geradores de ruído rico em baixa frequência	11
3 Programa Experimental.....	19
3.1 Introdução	19
3.2 Fontes sonoras de Impacto.....	19
3.2.1 Máquina de percussão normalizada.....	19
3.2.2 Máquina de percussão modificada	19
3.2.3 Bola de Impacto.....	21
3.2.4 Atividade Humana.....	23
3.3 Ensaio e medições	24
3.3.1 Introdução.....	24
3.3.2 Equipamentos e procedimentos	24
3.3.3 Metodologia de ensaio e tratamento de dados.....	25
3.4 Soluções Construtivas Ensaçadas	30
4 Apresentação e análise de resultados	33

4.1	Introdução	33
4.2	Análise de Resultados por solução construtiva.....	33
4.2.1	Laje de Betão Armado	35
4.2.2	Laje de Vigotas	38
4.2.3	Laje de Madeira	41
4.3	Correlações dos resultados obtidos com as diferentes fontes	44
4.3.1	Correlação da bola de Impacto com as restantes fontes	44
4.3.2	Correlação da atividade humana com as restantes fontes.....	50
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	56
6	Referências Bibliográficas	58

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Comparação dos valores (Leq) obtidos, por banda de frequência, para as medições obtidas no cockpit de um avião e nas proximidades de um silo. Fonte: Alves-Pereira e A. Castelo Branco (2007).	6
Figura 2.2 - Comparação dos valores medidos (Leq) na proximidade de ambas as famílias, nas bandas de frequência 6.3 Hz a 20 Hz. Fonte: Mariana Alves-Pereira e Nuno Castelo Branco (2007).	7
Figura 2.3 – Isolamentos sonoros regulamentares impostos pelo DL 96/2008 para um edifício de utilização mista. Fonte: Slides aulas AVEE (2016/2017).	8
Figura 2.4 – “Bang Machine”. Fonte: www.rion-sv.com	12
Figura 2.5 - Transdutor de força utilizado. Fonte: Shi et al (1997).	13
Figura 2.6 - Aparato de ensaio utilizado para caracterizar a passada humana e a queda de bolas. Fonte: Shi et al (1997).	13
Figura 2.7 - Comparação de espectros de frequência entre as atividades humanas e os martelos da máquina de impacto normalizado segundo as normas ISO. Fonte: Shi et al (1997).	14
Figura 2.8 - Comparação de espectros de frequência entre atividade humana, os martelos da máquina de impacto normalizado (segundo as normas ISO), os sacos de areia e os pneus. Fonte: Shi et al (1997)	15
Figura 2.9 – Análise correlacional a realizar entre diferentes espessuras de laje para fontes de percussão normalizadas e fontes de impacto reais. Fonte: Yeon et al (2017).	15
Figura 2.10 – Correlação entre fontes de impacto normalizadas. Fonte: Yeon et al (2017).	16
Figura 2.11 - Força de Impacto de crianças a correr (direita) e Força de Impacto da bola de borracha com várias alturas de queda. Fonte: Yeon et al (2017).	17
Figura 2.12 - Correlação obtida para os índices únicos para os ensaios realizados com as máquinas de percussão normalizadas e a queda da bola de borracha a 40 cm de altura. Fonte: Yeon et al (2017).	18
Figura 3.1 - Máquina de Percussão Normalizada. Fonte: Site www.bksv.com	19
Figura 3.2 - Máquina de Impacto Modificada: Método A- Fixação de molas aos martelos. Fonte: ISO 10140-5:2010, Anexo F (1 -altura de queda; 2- mola).	20

Figura 3.3 - Máquina de Impacto Modificada: Método B- Colocação de camada entre os martelos e o pavimento a ensaiar. Fonte: ISO 10140-5:2010, Anexo F (1- altura de queda; 3- martelo; 4- camada flexível; 5 – pavimento).	20
Figura 3.4 - Nível de força de impacto que deve ser gerado pela bola de impacto selecionada. Fonte: ISO 10140-5:2010 (X – Frequência em banda de oitava (Hz); Y – nível de exposição da força de impacto (dB)).	22
Figura 3.5 – Descrição temporal da força introduzida pela bola de impacto. Fonte: ISO 10140-5:2010.	23
Figura 3.6 - Secção transversal da fonte de impacto sugerida pela norma ISO 10140-5:2010. Fonte: ISO 10140-5:2010.	23
Figura 3.7 – Câmaras acústicas ITeCons. Fonte: Site www.itecons.uc.pt	24
Figura 3.8 – Equipamentos utilizados no ensaio: a) microfones modelo 4190; b) calibradores acústicos modelo 4231; c) girafas rotativas modelo 3923. Fonte: Site www.bksv.com	25
Figura 3.9 – Lajes de suporte selecionadas: a) Laje de betão armado; b) Laje de vigotas e abobadilhas cerâmicas; c) Laje de madeira.	31
Figura 3.10 – Exemplo de montagem dos reforços acústicos nos diferentes tipos de laje: a) Colocação da camada resiliente na laje de betão armado; b) camada resiliente com a colocação de pavimento flutuante como acabamento final; c) colocação da camada de OSB sobre os apoios resilientes discretos, com lã mineral na caixa-de-ar.	32
Figura 4.1 – Comparação entre os níveis sonoros de percussão normalizados e os níveis de pressão sonora máximos gerados pela bola de impacto na laje de betão sem revestimento.	34
Figura 4.2 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado	36
Figura 4.3 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.	37
Figura 4.4 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado reforçada com uma camada de material resiliente e uma lajeta flutuante como acabamento final.	38
Figura 4.5 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas.	39
Figura 4.6 – Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.	40

Figura 4.7 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas reforçada com apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB com lâmina mineral na caixa-de-ar.	41
Figura 4.8 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira.	42
Figura 4.9 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.	43
Figura 4.10 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira reforçada com apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB com lâmina mineral na caixa-de-ar.	44
Figura 4.11 – Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 50 Hz.	45
Figura 4.12 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 50 Hz. .	46
Figura 4.13 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 50 Hz.	46
Figura 4.14 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 63 Hz.	47
Figura 4.15 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 63 Hz. .	47
Figura 4.16 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 63 Hz.	48
Figura 4.17 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 80 Hz.	49
Figura 4.18 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 80 Hz. .	49
Figura 4.19 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 80 Hz.	50
Figura 4.20 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 50 Hz.	51
Figura 4.21 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 50 Hz.	51
Figura 4.22 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 50 Hz.	52

Figura 4.23 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 63 Hz.	53
Figura 4.24 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 63 Hz.	53
Figura 4.25 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 63 Hz.	54
Figura 4.26 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 80 Hz.	54
Figura 4.27 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 80 Hz.	55
Figura 4.28 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 80 Hz.	55

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

O conforto dos utilizadores nas suas habitações é cada vez mais dependente das condições acústicas, sendo bem conhecido o efeito nocivo que o excesso de exposição ao ruído pode provocar na saúde e bem-estar das pessoas (World Health Organization, 2011).

Para aumento do conforto dos utilizadores e prevenção de problemas relacionados com o excesso de exposição ao ruído, é da maior importância executar um bom projeto acústico e, naturalmente, que este seja corretamente implementado em obra. No entanto, existem fatores que não são tidos em conta na execução dos projetos acústicos, como a contabilização do som de baixa frequência e dos seus efeitos no ser humano.

O estudo do isolamento de soluções construtivas a sons de baixa frequência tem sido alvo de crescente atenção. Isto deve-se ao facto do mercado da construção ter convergido para uma construção com volumetrias mais reduzidas e materiais que possuem menor massa. Elementos mais leves possuem menor rigidez e, consequentemente, possibilitam uma maior transmissão de ruído, por outro lado a menor volumetria dos espaços condiciona o seu modo de vibração. No entanto, elementos construtivos leves em espaços com volumes baixos não é exclusivo da nova construção. Edifícios antigos e com a estrutura em madeira também apresentam fracos isolamentos sonoros em baixas frequência.

Neste contexto, é de extrema importância o estudo do isolamento sonoro em baixa frequência, para as soluções construtivas utilizadas correntemente no mercado da construção nova e da reabilitação, procedendo alargando a caracterização acústica às baixas frequências. No entanto, as normas internacionais ISO em vigor para a determinação de isolamento sonoro de soluções construtivas, tanto laboratoriais como *in situ*, propõem métodos de ensaio com a banda de frequência mínima de um terço de oitava igual a 100 Hz, sugerindo ainda métodos de medição alternativos para a inclusão de bandas de frequência mais baixas.

No caso do ensaio de pavimentos, existem estudos que indicam que a fonte de percussão normalizada, indicada pelas normas internacionais ISO, não é capaz de reproduzir fidedignamente o ruído em baixa frequência que existe nas habitações. Neste momento, as normas ISO propõem métodos e fontes alternativos de medição para a caracterização do isolamento em frequências a partir dos 50 Hz.

1.2 Objetivos

O trabalho apresentado na presente dissertação tem como principal objetivo a comparação dos níveis sonoros gerados por diferentes fontes de percussão em diferentes soluções construtivas de pavimentos. Utilizaram-se as seguintes fontes: fonte de percussão normalizada, fonte de percussão modificada, bola de impacto e um indivíduo a saltar.

Realizou-se o estudo de diferentes soluções construtivas que podem ser utilizadas na construção de edifícios e foi estudado o seu comportamento a sons de percussão, em laboratório para uma gama de frequências alargada, com início na banda de um terço de oitava de 50 Hz, quando excitadas com recurso a diferentes fontes e métodos propostos pelas normas internacionais ISO. Foi ainda utilizada uma fonte de impacto alternativa proposta pelo autor que consistiu na colocação de um indivíduo a saltar, de forma a tentar simular uma fonte mais real, presente nas habitações.

As soluções construtivas são constituídas por uma laje de suporte (laje de betão armado, laje aligeirada de vigotas e abobadilhas e laje de madeira) e por soluções de reforço acústico que podem ser utilizados na construção nova ou em reabilitação, como é o caso de colocação de mantas resilientes sob betonilhas ou pavimentos flutuantes.

Para cada uma das soluções construtivas pretendeu-se averiguar qual das fontes representava melhor o ruído gerado pelo indivíduo a saltar. Para o efeito comparou-se o espectro obtido para cada fonte sonora indicada pelas normas com o espectro obtido para a atividade humana. Adicionalmente à análise das curvas de isolamento ao longo da frequência, para frequências específicas, analisou-se a correlação existente entre pares de fontes através de uma regressão linear entre os valores medidos para as diferentes

soluções construtivas. As fontes que se usaram como base de comparação foram a bola de impacto e a atividade humana.

1.3 Organização do documento

A dissertação é composta por 5 capítulos que se encontram organizados em secções e subsecções, de acordo com o resumo abaixo apresentado.

Assim, no primeiro capítulo é apresentado o tema da dissertação, um pequeno enquadramento e os objetivos principais deste trabalho.

Já no segundo capítulo, são abordados aspetos relacionados com o isolamento de soluções construtivas nas baixas frequências, o enquadramento legal e normativo, bem como as diferentes fontes de percussão existentes.

No terceiro capítulo são apresentadas as fontes de percussão consideradas no estudo, os respetivos métodos de ensaio e de cálculo, os equipamentos utilizados e, ainda, as soluções construtivas ensaiadas.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes soluções ensaiadas tendo em conta as fontes selecionadas. Neste capítulo é ainda exposta uma breve análise dos resultados obtidos tendo em conta a observação dos gráficos elaborados.

Por fim, são apresentadas as principais conclusões que se tiram do trabalho realizado, expõem-se os possíveis trabalhos futuros e indicam-se as referências bibliográficas que serviram como suporte para a realização do presente trabalho.

2 Ruídos de Percussão

O conforto dos utilizadores nas suas habitações é cada vez mais dependente das condições acústicas. É bem conhecido o efeito nocivo que o excesso de exposição ao ruído pode provocar na saúde e bem-estar das pessoas.

Atualmente, uma das maiores fontes de desconforto nas habitações são os ruídos relacionados com os sons de impacto nos elementos de pavimento pertencentes aos fogos, que se propagam pelo edifício, causando incómodo a todos os utilizadores.

O ruído incómodo é produzido por perturbações sobre um elemento construtivo do edifício que são transmitidas e radiadas ao longo dos elementos estruturais do edifício. Estas perturbações podem ser provocadas pelo caminhar, queda ou arrastar de objetos, pelo funcionamento de equipamentos de limpeza (máquinas de lavar e secar roupa e máquina de lavar louça) ou equipamentos de desporto pessoais (passadeiras), entre outros.

Existem cada vez mais preocupações em executar um projeto acústico adequado que permita atenuar e minimizar a incomodidade provocada pelo ruído. Apesar da importância que um projeto acústico devidamente executado possa ter, existem determinados aspetos que não são tidos em conta devidamente. Uma das vertentes que não recebe a devida atenção é o isolamento das soluções construtivas para sons de baixas frequências.

O isolamento de sons de baixas frequências tem sido alvo de crescente atenção. Isto deve-se ao fato do mercado da construção ter convergido para uma construção com volumetrias mais reduzidas e materiais que possuem menor massa. A diminuição das volumetrias dos espaços provoca alterações nos modos de vibração dos mesmos, aumentando a frequência de ressonância de um espaço, para bandas de frequência coincidentes com as baixas frequências da gama audível do ser humano. A menor massa das soluções construtivas também tem influência na transmissão dos sons de percussão pelas mesmas. Elementos mais leves possuem menor rigidez e conseqüentemente ocorre uma maior transmissão de ruído por os mesmos. No entanto, o isolamento sonoro nas baixas frequências não é um problema exclusivo da construção nova. Como foi referido

anteriormente, o fraco isolamento sonoro em baixas frequências é um problema de soluções construtivas mais leves, como é o caso das construções em madeira, muito habitual em edifícios mais antigos. Ou seja, em obras de reabilitação, onde predominam soluções construtivas leves, como é o caso das construções em madeira, o isolamento sonoro nas baixas frequências é um problema a ter em consideração.

2.1 Efeito do som de baixa frequência no ser humano

A construção mais leve e o aumento das fontes geradoras de ruído com componentes de baixa frequência tem levado ao crescimento das preocupações sobre os efeitos que o ruído forte em baixa frequência pode causar na população.

Com a preocupação dos efeitos nocivos que o ruído rico em baixas frequências pode ter, diversos investigadores efetuaram estudos e pesquisas que lhes permitissem ganhar um melhor conhecimento desses efeitos.

Em 1978, (Broner, 1978) realizou uma revisão do estado da arte no que diz respeito aos sons ricos em baixas frequências e o seu efeito nas pessoas. O autor afirma que a exposição ao ruído de baixa frequência pode estar relacionada com o aparecimento de náuseas, indisposição geral, insónias e até mesmo desorientação. Afirma ainda que existe um aumento constante de fontes geradoras em ruído de baixa frequência, tanto no interior como no exterior das habitações.

Alves-Pereira e A.Castelo Branco (2009) estudaram o efeito que a exposição ao ruído de baixa frequência tinha na saúde humana, através da monitorização de duas famílias. Uma das famílias vivia nas proximidades de um silo de cereais internacional de águas profundas e outra vivia nas proximidades de geradores eólicos. Em ambos os locais, as medições acústicas foram realizadas em bandas de 1/3 de oitava em dB linear, com as medições a começarem em 6.3 Hz para o primeiro caso e em 1 Hz para o segundo caso.

Os autores consideram que a exposição a ruídos ricos em baixas frequências pode causar doença vibro-acústica, que consiste numa patologia sistémica induzidas por exposição excessiva a ruídos ricos em baixas frequências. Pode causar problemas cardiovasculares, excesso de produção de colagénio pelo corpo humano, entre outros. Por não existirem padrões estabelecidos para os níveis de exposição a ruídos de baixa frequência, os níveis obtidos nas medições foram comparados com os níveis medidos no cockpit de um avião comercial, uma vez que, segundo os autores, o ambiente acústico presente nos cockpits conduz ao desenvolvimento de doença vibro-acústica.

Na Figura 2.1 apresenta-se a comparação entre as medições acústicas obtidas nas proximidades do silo internacional de águas profundas e no cockpit de um avião.

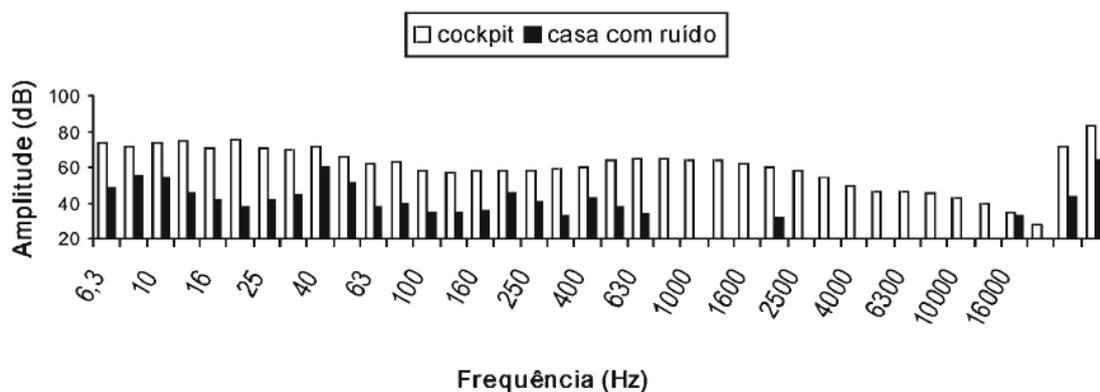


Figura 2.1 – Comparação dos valores (L_{eq}) obtidos, por banda de frequência, para as medições obtidas no cockpit de um avião e nas proximidades de um silo. Fonte: Alves-Pereira e A. Castelo Branco (2007).

Verifica-se que, para todo o espectro apresentado, os níveis de pressão sonora obtidos nas medições do silo são inferiores aos níveis de pressão sonora obtidos no interior de um cockpit. Apesar de tudo não se conclui que os níveis de pressão sonora provocados pelo não sejam prejudiciais à saúde dos indivíduos que a estes estejam expostos.

Na Figura 2.2 é apresentada a comparação entre os valores medidos na proximidade do silo de águas internacionais e os valores medidos na proximidade dos geradores eólicos, dos 6.3 Hz aos 20 Hz. A família que vive na proximidade dos silos é designada como Família F e a família que vive na proximidade dos geradores eólicos é designada como Família R.

Observando a Figura 2.2 verifica-se que os níveis sonoros nas proximidades dos geradores eólicos são maiores do que os níveis sonoros na proximidade do silo.

Por fim, os autores concluíram que o aparecimento de doenças vibro acústicas se encontra relacionado com a exposição a ruído de baixas frequências e que não acontece apenas nos locais de trabalho. Por questões de saúde pública, sugerem que os estudos acústicos devam incorporar os sons de baixas frequências.

No entanto, existem outros estudos que mostram que o ruído pode não ter influência no desempenho de funções, seja ele rico em baixa frequência ou em alta frequência.

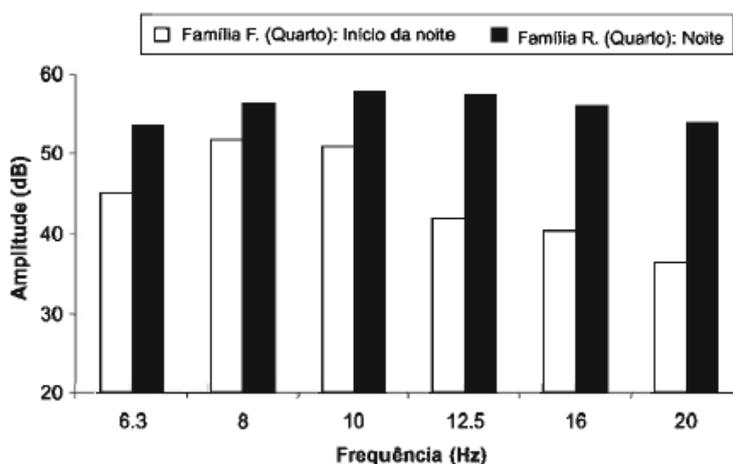


Figura 2.2 - Comparação dos valores medidos (L_{eq}) na proximidade de ambas as famílias, nas bandas de frequência 6.3 Hz a 20 Hz. Fonte: Mariana Alves-Pereira e Nuno Castelo Branco (2007).

Alimohammadi e Ebrahimi (2017) realizaram um estudo experimental que comparou os efeitos que o ruído de baixa e alta frequência podem ter no sistema cognitivo de um indivíduo. O estudo incidiu sobre um total de 98 indivíduos, 54 do sexo masculino e 35 do sexo feminino, que foram expostos a ruído de alta e baixa frequência e a níveis de pressão sonora de 50 dB e 70 dB.

Os resultados do estudo efetuado mostraram que a exposição ao ruído de ambas as naturezas, para além de não provocarem efeitos negativos nos indivíduos sujeitos ao teste, ainda melhoraram as suas performances. No entanto, é da maior importância referir que existem imensos fatores que podem contribuir para os efeitos que o ruído possa ter numa pessoa, tal como a complexidade das tarefas a desempenhar.

No entanto, a subjetividade do estudo acima indicado não replica a exposição ao ruído em baixa frequência, que pode ter diferentes consequências no ser humano, consoante o nível de ruído, o tempo de exposição e, acima de tudo, o indivíduo que se encontra exposto ao ruído.

2.2 Enquadramento legal e normativo

Os limites legais para os parâmetros que quantificam o isolamento sonoro para habitações na Europa estão bem definidos na respetiva Lei de cada país e, os métodos utilizados para os determinar encontram-se descritos nas normas internacionais de ensaio.

O enquadramento legal estabelecido pelo Decreto-Lei 96/2008 de 9 de Junho, ou Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, regula a vertente do conforto acústico, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações.

O DL 96/2008 abrange desde os edifícios habitacionais e mistos até auditórios e salas de culto, permitindo mais do que um tipo de utilização no mesmo edifício, estabelecendo por isso exigências em termos de isolamentos sonoros, condicionamento acústico, entre outros. A título de exemplo, a Figura 2.3 apresenta os limites regulamentares para um edifício de utilização misto. Para além do referido anteriormente, o DL 96/2008 tem ainda o objetivo de verificar a conformidade do projeto acústico no final da empreitada. Os ensaios de verificação *in situ* do projeto acústico são realizados seguindo as indicações das normas internacionais ISO 16283-1, ISO 16283-2, ISO 16283-3 e ISO 16032.

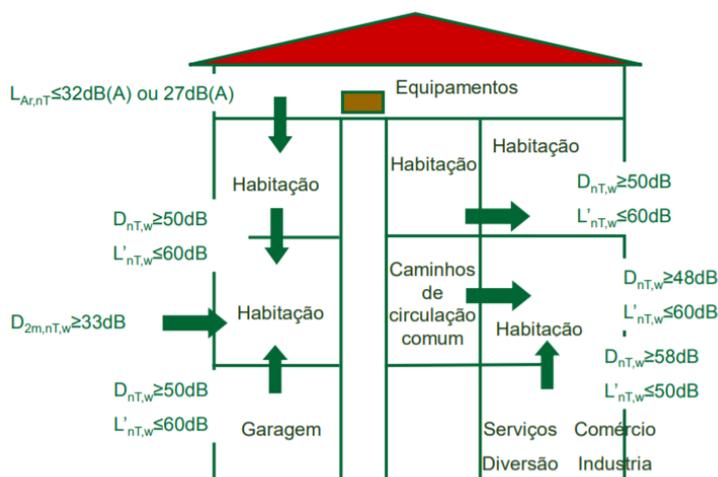


Figura 2.3 – Isolamentos sonoros regulamentares impostos pelo DL 96/2008 para um edifício de utilização mista. Fonte: Slides aulas AVEE (2016/2017).

No que diz respeito ao projeto acústico, este deve ser baseado num conjunto de fatores, sendo que um deles deve ser a escolha de soluções construtivas capazes de garantir, no mínimo, o cumprimento dos requisitos impostos pela Lei, ou seja, os requisitos indicados pelo DL 96/2008. No entanto um projetista acústico deve ambicionar ultrapassar os limites mínimos legais e procurar encontrar soluções construtivas que garantam um nível de conforto acústico superior.

A escolha das soluções adequadas para cada tipo de projeto acústico deve ser realizada com base na sua caracterização acústica em laboratório, apesar de não ser o que se verifica em grande parte das situações. Os ensaios de caracterização laboratorial de soluções construtivas são realizados de acordo com as indicações e métodos descritos nas normas internacionais da série ISO 10140. No entanto um ensaio laboratorial de caracterização acústica de uma solução construtiva, seguindo as indicações das normas ISO 10140, exige como mínimo uma gama de frequências que tem início na banda de frequência de um terço de oitava de 100 Hz e fim na banda de frequência de um terço de oitava de 5000 Hz. Excepcionalmente, se for necessária informação adicional para baixas frequências podem utilizar-se as bandas de frequência de 50, 63 e 80 Hz.

No entanto encontram-se descritos nas normas referidas métodos de ensaio com fontes alternativas, que incluem na sua caracterização uma gama de frequência mais alargada, incluindo assim bandas de frequência com início nos 50 Hz. A caracterização laboratorial de soluções construtivas tem início nos na banda de um terço de oitava de 50 Hz, pois os modos de vibração das câmaras acústicas são dependentes dos volumes das mesmas. Seria necessário que as câmaras acústicas tivessem volumetrias consideravelmente grandes para que os modos de vibração das câmaras não tivessem influência nas medições abaixo dos 50 Hz.

Rasmussen (2010) publicou um estudo relativo aos parâmetros utilizados por 24 países Europeus no que diz respeito ao isolamento entre fogos. No seu estudo a autora apresenta valores mínimos legais que uma habitação necessita de apresentar no que diz respeito a requisitos acústicos, apresentados na Tabela 2.1.

Observando a Tabela 2.1 verifica-se que o parâmetro legal a cumprir, nos países considerados no estudo, no que diz respeito ao isolamento a sons de percussão, varia de país para país. Verifica-se também que existem descritores comuns a vários países, como é o caso do $L'_{nT,w}$ que é o descritor considerado pela Áustria e Bélgica, ou o exemplo do $L'_{n,w}$ que é considerado pela Estónia e pela Itália. Existem países cujo parâmetro legal a cumprir apresenta o mesmo requisito, como é o caso da Dinamarca e

da Estónia, para edifícios multi-habitacionais. No entanto podem existir casos onde existam algumas diferenças no valor limite a considerar quando se trata de um edifício multi-habitacional, como é o caso da República Checa e Dinamarca.

Tabela 2.1 – Requisitos de isolamento a sons de percussão em 24 países da Europa.

Fonte: Rasmussen (2010).

Country	Descriptor ^c	Multi-storey housing Req. (dB)	Row housing Req. (dB)
Austria	$L'_{nT,w}$	≤ 48	≤ 43
Belgium	$L'_{nT,w}$	$\leq 58^g$	≤ 50
Czech Rep.	$L'_{n,w}$	≤ 58	≤ 53
Denmark	$L'_{n,w}$	≤ 53	≤ 53
Estonia	$L'_{n,w}$	≤ 53	≤ 53
Finland	$L'_{n,w}^f$	$\leq 53^f$	$\leq 53^f$
France	$L'_{nT,w}$	≤ 58	≤ 58
Germany ^j	$L'_{n,w}$	≤ 53	≤ 48
Hungary	$L'_{n,w}$	≤ 55	≤ 45
Iceland	$L'_{n,w}^e$	$\leq 58^h$	≤ 53
Ireland	$L'_{nT,w}$	≤ 62	None
Italy	$L'_{n,w}$	≤ 63	≤ 63
Latvia	$L'_{n,w}$	≤ 54	≤ 54
Lithuania	$L'_{n,w}$	≤ 53	≤ 53
Netherlands	I_{co}^d	$\geq + 5$	$\geq + 5$
Norway	$L'_{n,w}^f$	$\leq 53^f$	$\leq 53^f$
Poland	$L'_{n,w}$	≤ 58	≤ 53
Portugal ^l	$L'_{n,w}$	≤ 60	≤ 60
Slovakia	$L'_{n,w}$	≤ 58	≤ 58
Slovenia	$L'_{n,w}$	≤ 58	≤ 58
Spain	$L'_{nT,w}$	≤ 65	≤ 65
Sweden	$L'_{n,w} + C_{L,50-2500}$	$\leq 56^i$	$\leq 56^i$
Switzerland	$L'_{nT,w} + C_1$	$\leq 53^k$	≤ 50
UK ^l	$L'_{nT,w}$	≤ 62	None

É de referir que o índice J no descritor utilizado em Portugal indica que o descritor considerado pela Lei Portuguesa foi revisto e alterado para $L'_{nT,w}$. Verifica-se ainda que a Suécia é o único país a considerar baixas frequências na avaliação e cumprimento dos requisitos acústicos.

António e Mateus (2015) analisaram um conjunto de medições *in situ* para ensaios de isolamento a sons aéreos e isolamento a sons de percussão, em edifícios com a construção tipicamente usada em Portugal. O objetivo do estudo realizado era o de aferir qual a influência que a inclusão das baixas frequências teria nos parâmetros $L'_{nT,w} + C_I$ e $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$. Os ensaios de isolamento a sons de percussão foram realizados em terços de oitava, dos 50 Hz aos 5000 Hz, segundo a norma já obsoleta, ISO 140-7. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Tabela 2.2

Tabela 2.2 - Média dos índices obtidos e respetivas incertezas para os diferentes grupos de ensaio.

Test group	Type of element	Direction of measurement	Average		Uncertainty	
			$L'_{nT,w} + C_I$	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{nT,w} + C_I$	$L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$
41-48	Floating laminate floor	Horizontal	41.50	42.10	1.91	2.01
49-59	Floating screed		43.40	43.80	1.94	2.04
60-63	Concrete slab		48.00	48.00	2.42	2.43
64-71	Floating laminate floor/floating screed	Vertical downward	51.10	51.30	1.95	1.98
72-75	Concrete slab		66.30	66.30	1.51	1.52
76-80	Concrete slab	Vertical upward	47.00	47.00	1.59	1.62
81-84	Floating laminate floor/floating screed		42.50	43.00	3.27	3.34

Os autores concluíram que para o caso dos pavimentos pesados tipicamente usados em Portugal, a inclusão das baixas frequências tem pouca influência no resultado do termos de adaptação.

2.3 Fontes geradores de ruído rico em baixa frequência

Para que sejam determinados os isolamentos a sons de percussão face a fontes de impacto com geração de ruído em baixa frequência, como passadas humanas ou crianças a saltar, a norma ISO 10140-3:2010 sugere um método alternativo, recorrendo à utilização de uma fonte de impacto pesada e macia.

Quando se pretende que exista uma boa correlação entre as fontes de ruído de percussão ditas reais e as artificiais e necessário que estas apliquem o mesmo espectro de força. A máquina de percussão normalizada é usada para reproduzir o ruído provocado por passadas humanas quando um indivíduo anda de sapatos, nomeadamente os saltos altos de uma senhora. No entanto, para a simulação de ruído semelhante ao de um indivíduo a andar descalço ou de crianças aos saltos, é necessário que sejam utilizadas fontes que apresentem melhor correlação com estes tipos de ruído como é o caso da máquina de percussão modificada e a bola de impacto, respetivamente.

Alguns países já dotaram outras fontes de impacto como fontes padrão para ensaio e caracterização de pavimentos e soluções construtivas. São exemplo disso países asiáticos, nomeadamente na Coreia e no Japão, onde as construções em madeira existem em maior abundância. Como as estruturas de madeira possuem pior isolamento quando comparadas com as estruturas de betão e originavam mais queixais relacionadas com o ruído provocado por crianças a correr, foi adotado como fonte normalizada uma “bang machine” (ilustrada na Figura 2.4) (Jeon et al (2009)). A “bang machine” tem sido utilizada como fonte de impacto normalizada no Japão nas últimas décadas.

No entanto, a fonte adotada apresentava alguns desvios face ao que as fontes de impacto reais apresentavam e, portanto, tornou-se necessário a consideração de uma outra fonte que tivesse um impacto que se aproximasse mais das fontes de impacto reais. Surgiu assim a bola de impacto.



Figura 2.4 – “Bang Machine”. Fonte: www.rion-sv.com

Shi et al (1997) realizaram um estudo comparativo entre diversas fontes de impacto sonoro e verificaram a aproximação das diversas fontes ao impacto criado durante o ato de andar de um indivíduo. O objetivo do estudo foi encontrar uma fonte de impacto que se aproximasse o melhor possível de uma passada humana. Foram também estudadas diversas passadas, consoante o tipo de passada, o peso do indivíduo de estudo e o tipo de sapato usado pelo indivíduo. Por fim, essas fontes de impacto foram comparadas com a máquina de impacto normalizada. A comparação entre fontes de impacto foi realizada com base nos respetivos espectros de força e frequência.

Para a caracterização da passada humana foram considerados 16 indivíduos de teste, 7 do sexo feminino e 9 do sexo masculino, com pesos compreendidos entre os 20 kg e os

90 kg. Para a caracterização das fontes de impacto alternativas foram consideradas bolas cheias com areia, com pesos de 2 kg, 3.5 kg e 8.5 kg, e sacos de nylon com areia, com pesos de 5.5 kg e 7 kg. As bolas e os sacos de areia foram deixados cair das alturas de 30 cm, 60 cm e 90 cm.

Com base nos procedimentos descritos nas normas Japonesas e Coreanas, que utilizam uma “Bang Machine” como fonte de percussão, procederam à caracterização de pneus de forma semelhante à caracterização dos sacos de areia referidos anteriormente. Ou seja, foram deixados cair das alturas de 30 cm, 60 cm e 90 cm, com pesos de 3 kg, 5 kg e 7 kg. Por fim foram caracterizados os martelos de impacto de uma máquina de impacto normalizada, segundo as normas ISO. Na caracterização da máquina de percussão normalizada, foi apenas caracterizado o impacto de um martelo, em vez dos habituais cinco, e foram utilizados martelos em aço e em borracha.

Todas as Fontes referidas foram caracterizadas utilizando um transdutor de força ilustrado na Figura 2.5 consoante o aparato apresentado na Figura 2.6.

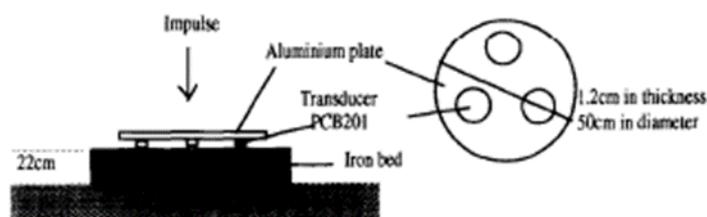


Figura 2.5 - Transdutor de força utilizado. Fonte: Shi et al (1997).

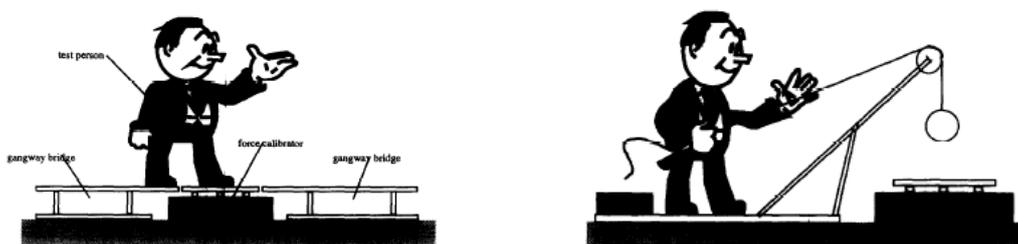


Figura 2.6 - Aparato de ensaio utilizado para caracterizar a passada humana e a queda de bolas. Fonte: Shi et al (1997).

A Figura 2.7 apresenta a comparação realizada, pelos autores, entre o ato de andar, correr e saltar executado por um indivíduo de 70 kg e o impacto provocado pelos martelos (martelo de aço e martelo de borracha) da máquina de percussão normalizada segundo as normas ISO.

Na Figura 2.8 são apresentadas as comparações entre as diversas fontes de impacto consideradas.

Do estudo realizado, os autores concluíram que a máquina de percussão normalizada, segundo as normas ISO, apresenta um espectro de frequências com diferenças bastante significativas do espectro obtido para as atividades humanas, sendo que as atividades humanas possuem muito maior componente em baixa frequência. Concluíram ainda que a bola cheia de areia apresenta um espectro em frequência semelhante com o das atividades humanas.

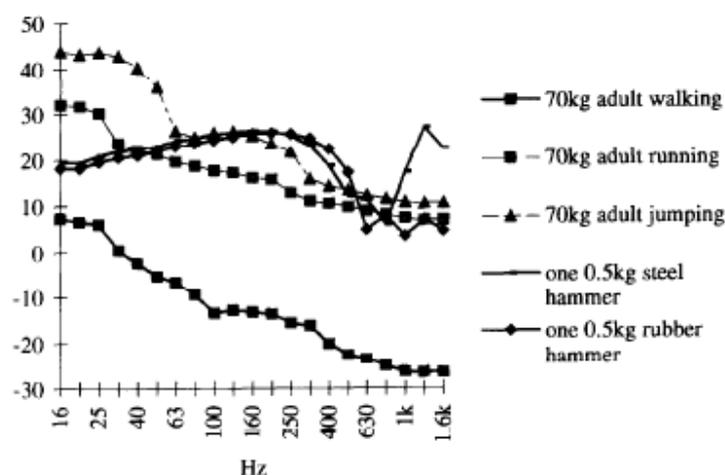


Figura 2.7 - Comparação de espectros de frequência entre as atividades humanas e os martelos da máquina de impacto normalizado segundo as normas ISO. Fonte: Shi et al (1997).

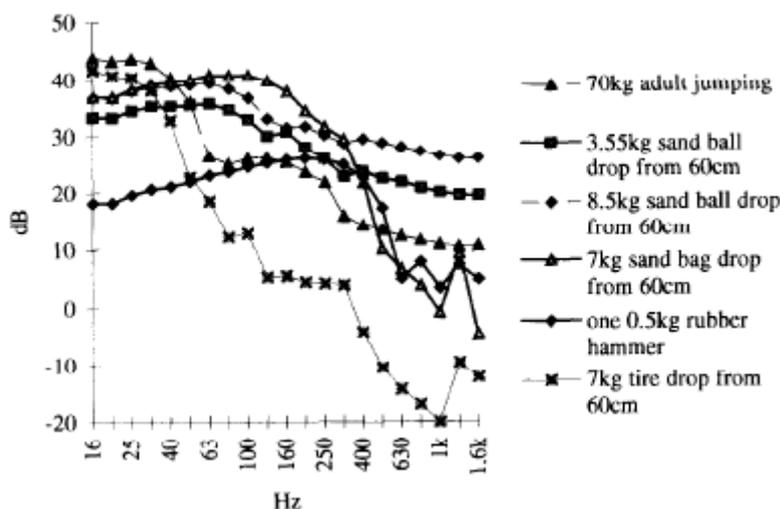


Figura 2.8 - Comparação de espectros de frequência entre atividade humana, os martelos da máquina de impacto normalizado (segundo as normas ISO), os sacos de areia e os pneus. Fonte: Shi et al (1997)

Yeon et al (2017), realizaram um estudo semelhante ao indicado anteriormente. Ensaíram 30 apartamentos, com base nas respectivas espessuras de laje para diferentes tipos de fontes de impacto, como ilustrado na Figura 2.9, com o objetivo de estudar a correlação entre o índice de isolamento obtido para as fontes de impacto normalizadas e as fontes de origem humana. A caracterização acústica, para as fontes de impacto foi feita em bandas de oitava, em dB(A), para as frequências de 63 Hz a 500 Hz.

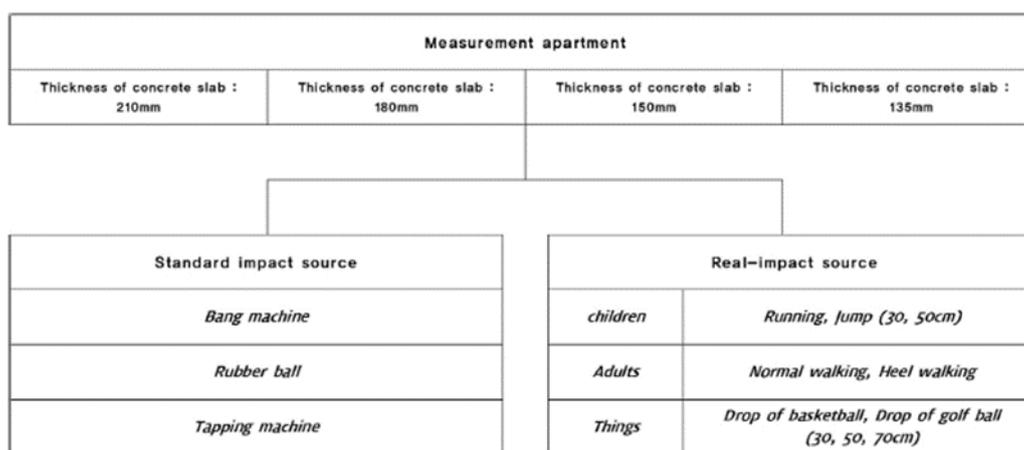


Figura 2.9 – Análise correlacional a realizar entre diferentes espessuras de laje para fontes de percussão normalizadas e fontes de impacto reais. Fonte: Yeon et al (2017).

A análise efetuada pelos autores mostra que as fontes “Bang Machine” e a bola de borracha apresentam a maior correlação para os resultados obtidos, sendo esta de 0.73, como se observa pela Figura 2.10.

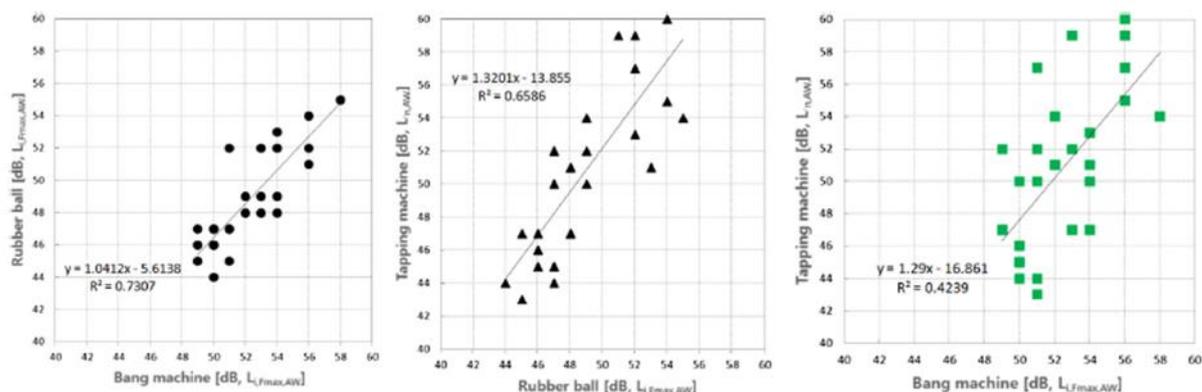


Figura 2.10 – Correlação entre fontes de impacto normalizadas. Fonte: Yeon et al (2017).

Foram também caracterizadas diversas fontes, ditas fontes de impacto reais, como a atividade humana e a queda de objetos, nomeadamente a queda de bolas, medindo a força de impacto provocada pelas diversas fontes consideradas. Ao serem comparadas as forças de impacto obtidas foi observado que a queda da bola de borracha, a uma altura de 40 cm, possui um impacto com força média de 1100 N como acontece para a passada de uma criança a correr, concluindo que aos dois tipos de fonte possuem uma força de impacto semelhante (Figura 2.11).

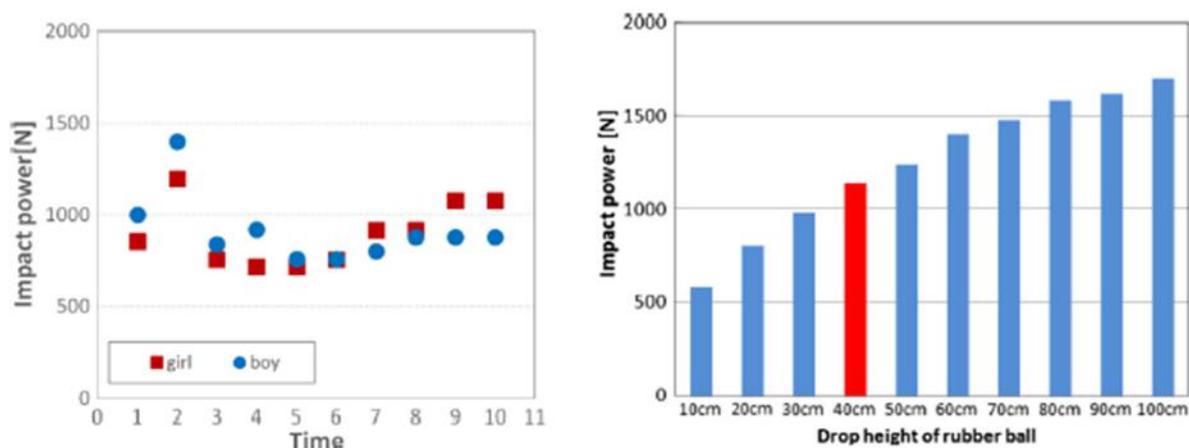


Figura 2.11 - Força de Impacto de crianças a correr (direita) e Força de Impacto da bola de borracha com várias alturas de queda. Fonte: Yeon et al (2017).

Devido à dificuldade de repetibilidade de impacto para fontes de impacto reais, foi usada a bola de borracha, deixada cair a uma altura de 40 cm, visto esta possuir um impacto semelhante ao de crianças a correr. A Figura 2.12 apresenta a comparação feita entre os índices únicos obtidos para os ensaios realizados com as fontes de impacto normalizadas e os níveis de pressão sonora, ponderados A, obtidos para a queda da bola de borracha a 40 cm de altura, para as lajes em estudo.

Observando a Figura 2.12 pode inferir-se que os níveis de pressão sonora obtidos para a queda da bola de borracha a 40 cm de altura apresentam uma maior correlação com os índices únicos obtidos na caracterização das diferentes lajes ensaiadas, apresentando uma correlação de 0.68. Concluindo, de forma indireta, que a atividade humana, mais especificamente uma criança a correr, apresenta uma maior correlação com a bola de borracha.

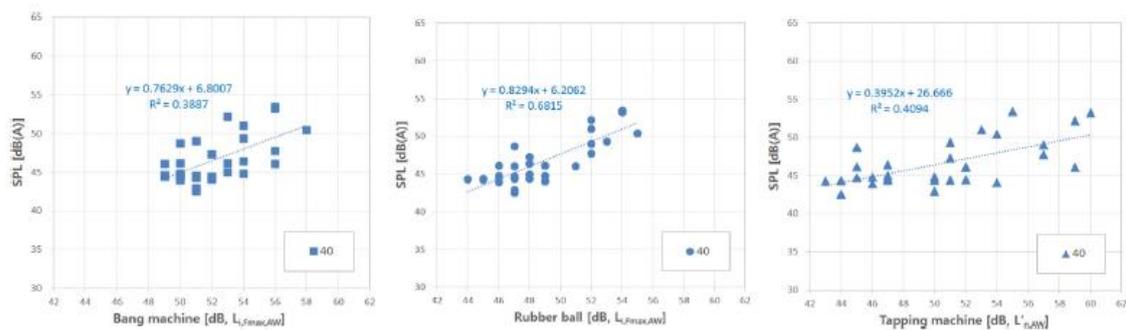


Figura 2.12 - Correlação obtida para os índices únicos para os ensaios realizados com as máquinas de percussão normalizadas e a queda da bola de borracha a 40 cm de altura.

Fonte: Yeon et al (2017).

3 Programa Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as fontes de impacto utilizadas, os métodos de ensaio e tratamento de resultados e as soluções construtivas a serem ensaiadas no âmbito do presente trabalho.

3.2 Fontes sonoras de Impacto

3.2.1 Máquina de percussão normalizada

Foi utilizada uma máquina de percussão normalizada Brüel & Kjaer, modelo 3207 (Figura 3.1). A máquina utilizada segue as especificações referidas na norma ISO 10140-5:2010.



Figura 3.1 - Máquina de Percussão Normalizada. Fonte: Site www.bksv.com.

A máquina possui 5 martelos, com 500 gramas cada, que caem de uma altura de 40 mm com uma frequência de 10 Hz.

3.2.2 Máquina de percussão modificada

A adaptação da máquina de percussão normalizada tem o objetivo de aproximar as características dinâmicas da fonte sonora às características dinâmicas da atividade humana, de forma a simular com melhor correlação o ruído provocado por um

individuo descalço. Para a adaptação da fonte sonora de percussão, o anexo F da norma ISO 10140-5:2010 indica dois métodos.

O Método A sugere a fixação de molas (Figura 3.2) aos martelos da máquina com a mesma secção transversal dos martelos de forma a manter a mesma área de contacto com o pavimento. As molas devem possuir uma rigidez dinâmica de $24 \text{ kN/m} \pm 10\%$ e um fator de perda entre 0.2 e 0.5, e a altura das quedas dos martelos deve ser ajustada de forma a serem mantidos os 40 mm de queda.

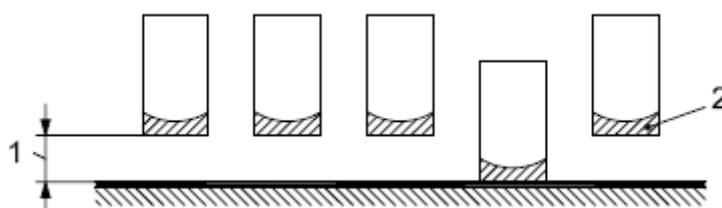


Figura 3.2 - Máquina de Impacto Modificada: Método A- Fixação de molas aos martelos. Fonte: ISO 10140-5:2010, Anexo F (1 -altura de queda; 2- mola).

O Método B sugere a colocação de uma camada flexível entre o pavimento a ensaiar e os martelos da fonte (Figura 3.3). A camada a colocar deve ser criada recorrendo à aglutinação de camadas finas e deve ocupar o mínimo espaço possível, devendo possuir, aproximadamente, 45 cm de comprimento e 5 cm de largura.

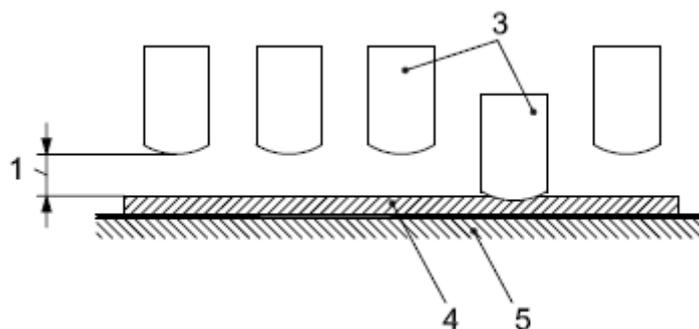


Figura 3.3 - Máquina de Impacto Modificada: Método B- Colocação de camada entre os martelos e o pavimento a ensaiar. Fonte: ISO 10140-5:2010, Anexo F (1- altura de queda; 3- martelo; 4- camada flexível; 5 – pavimento).

No que diz respeito às características do material flexível, este deve possuir uma rigidez dinâmica de $34 \text{ MN/m}^3 \pm 10\%$ e um fator de perda entre 0.2 e 0.5. O valor de rigidez dinâmica deve ser determinado seguindo as indicações da norma ISO 9052-1 e o fator de perda deve ser determinado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{b}{f_{res}} \quad (1)$$

Sendo:

b – largura de banda de meia potência (correspondente a -3dB da amplitude na frequência de ressonância);

f_{res} – frequência de ressonância determinada pelo método proposto na norma ISO 9052.

Determinou-se a rigidez dinâmica de vários materiais e selecionou-se aquele que melhor respondia aos requisitos da norma. O material é uma espuma elastomérica de célula fechada, com 10 mm de espessura, com um valor de Rigidez Dinâmica Aparente de 33 MN/m^3 e um fator de perdas de 0.36. Seguindo as orientações da norma ISO 9052-1, para se obter o valor de rigidez dinâmica de um material, é necessário aplicar um fator corretivo ao valor obtido de rigidez dinâmica aparente. Esse fator corretivo depende do valor de resistividade ao fluxo de ar lateral do material. Considerando que o material se trata de uma espuma de célula fechada estima-se que a sua resistividade lateral seja superior a 100 kPa/m^2 e, conseqüentemente, o valor de rigidez dinâmica é igual ao valor de rigidez dinâmica aparente.

Refira-se que, apesar do método proposto indicar que a altura da queda dos martelos deva ser adaptada, com base na altura da camada colocada, para a realização dos ensaios, na realidade para evitar alterações na máquina que exigissem calibrações adicionais da mesma, optou-se por não efetuar essa adaptação para a realização dos ensaios que compõem este trabalho, tendo consciência que a ligeira variação da altura de queda poderá ter uma ligeira influência nos resultados.

3.2.3 Bola de Impacto

A bola de borracha usada neste trabalho, cujo objetivo é simular o ruído provocado por uma criança a saltar, é da marca Rion, modelo YI-01. Esta fonte alternativa é proposta pela norma ISO 10140-5:2010. A norma especifica que a bola utilizada como fonte de impacto cumpra os requisitos ilustrados nas seguintes figuras (Figura 3.4 e Figura 3.5).

As figuras apresentam o espectro de níveis de impacto e o espectro de força que a bola de borracha selecionada necessita de apresentar para ser considerada uma fonte de impacto válida, quando deixada cair de uma altura de 100 ± 1 cm.

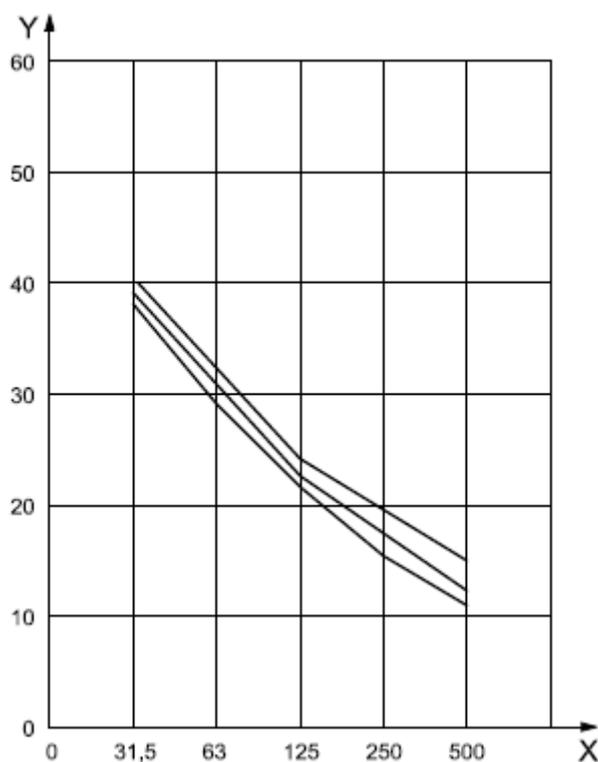


Figura 3.4 - Nível de força de impacto que deve ser gerado pela bola de impacto selecionada. Fonte: ISO 10140-5:2010 (X – Frequência em banda de oitava (Hz); Y – nível de exposição da força de impacto (dB)).

A norma sugere ainda um exemplo de construção e composição para uma fonte de impacto válida como sendo uma bola oca, com 1180 mm de diâmetro e uma espessura de 30 mm, com uma massa de 2.5 ± 0.1 kg e um coeficiente de restituição 0.8 ± 0.1 . A Figura 3.6 apresenta o corte transversal da construção de fonte de impacto sugerida pela norma.

O fabricante da bola utilizada no presente trabalho garante que cumpre com as especificações da norma ISO.

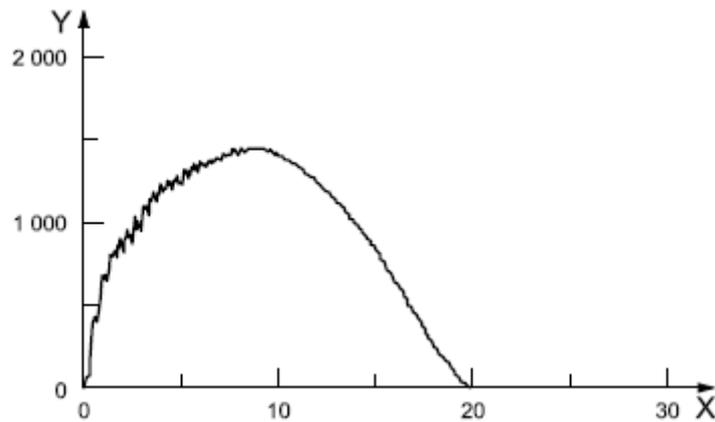


Figura 3.5 – Descrição temporal da força introduzida pela bola de impacto. Fonte: ISO 10140-5:2010.

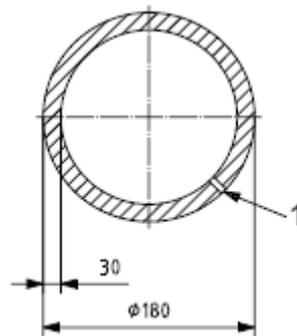


Figura 3.6 - Secção transversal da fonte de impacto sugerida pela norma ISO 10140-5:2010. Fonte: ISO 10140-5:2010.

3.2.4 Atividade Humana

Com o objetivo de comparar fontes normalizadas com algo mais semelhante com uma fonte de impacto real, foi solicitado a um indivíduo, do sexo masculino, com aproximadamente 70 kg, com calçado de sola de borracha, que saltasse a uma altura constante e com uma cadência certa.

3.3 Ensaios e medições

3.3.1 Introdução

Os ensaios realizados no âmbito deste trabalho foram executados seguindo as indicações das normas ISO 10140-3:2010 e ISO 10140-4:2010. A norma referida especifica os métodos de ensaio laboratoriais para ensaios de isolamento a sons de percussão, permitindo a classificação acústica das soluções construtivas.

3.3.2 Equipamentos e procedimentos

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as câmaras acústicas do ITeCons (Figura 3.7). As câmaras acústicas são compostas por duas salas verticalmente adjacentes, com a solução construtiva a ensaiar a separar as duas salas. É da maior importância referir que as salas se encontram devidamente desligadas uma da outra para evitar transmissões marginais e que o isolamento sonoro da câmara recetora é elevado e existe uma camada resiliente na sua base para evitar que ruídos e vibrações externos ao ensaio contaminem os resultados.

A câmara recetora apresenta uma forma paralelepipedica, com dimensões de 3,92 m x 3,92 m, com um pé direito de 4,72 m, e paredes duplas de betão armado e alvenaria com cerca de 50 cm de espessura. Tem um volume de 75,27 m³, garante os 50 m³ mínimos exigidos pela norma ISO 10140-5:2010, garantindo que, a volumetria da câmara recetora e os seus modos de vibração próprios não têm influência para medições superiores à banda de frequência dos 50 Hz.



Figura 3.7 – Câmaras acústicas ITeCons. Fonte: Site www.itecons.uc.pt

Para as medições dos níveis de pressão sonora foram utilizados microfones modelo 4190 da Brüel & Kjaer (Figura 3.8 a)), calibradores acústicos do modelo 4231 da Brüel & Kjaer (Figura 3.8 b)) e girafas rotativas do modelo 3923 da Brüel & Kjaer (Figura 3.8 c)).

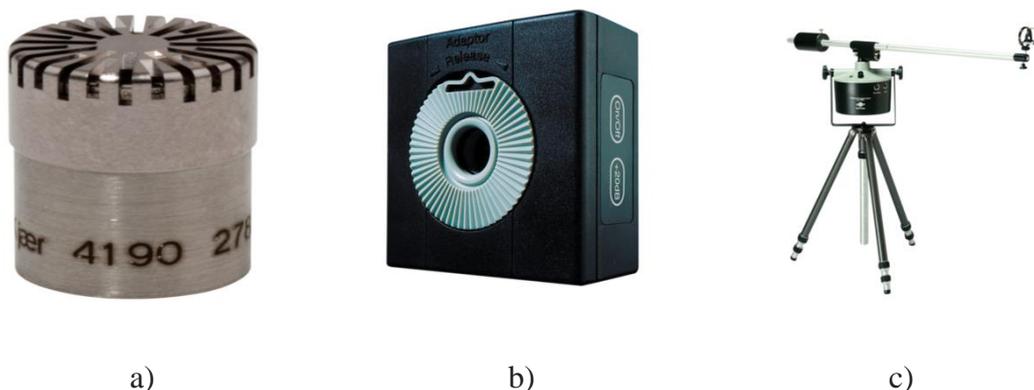


Figura 3.8 – Equipamentos utilizados no ensaio: a) microfones modelo 4190; b) calibradores acústicos modelo 4231; c) girafas rotativas modelo 3923. Fonte: Site www.bksv.com

3.3.3 Metodologia de ensaio e tratamento de dados

De seguida serão apresentadas as metodologias e tratamento de dados aplicados consoante a fonte utilizada.

3.3.3.1 Fonte de Percussão Normalizada e Modificada

O ensaio com a fonte de percussão normalizada e fonte de percussão modificada foi realizado seguindo as indicações da norma ISO 10140-3:2010.

O objetivo do ensaio é a determinação do nível sonoro normalizado através da seguinte expressão:

$$L_n = L_i + 10 * \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (2)$$

onde:

L_n – nível sonoro de percussão normalizado (dB) por banda de frequência;

L_i – nível sonoro médio, provocado pela fonte de percussão, corrigido com o ruído de fundo (dB) por banda de frequência;

A – área de absorção equivalente por banda de frequência (m^2);

A_0 – área de absorção equivalente de referência ($10 m^2$).

Em primeiro lugar são medidos os níveis de pressão sonora, provocados pela máquina de percussão para as n posições de fonte, nas câmaras emissora e recetora, denominados $L_{TS,j}$ e L_{2j} , respetivamente.

Para os níveis obtidos são determinados, por banda de frequência, os níveis sonoros médios:

$$L_{med_i} = 10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (3)$$

Com:

L_{med_i} – nível sonoro médio para a banda de i (dB);

L_j – nível sonoro correspondente à medição j ;

n – número de medições/posições de fonte efetuadas.

De seguida são medidos, na câmara emissora ($L_{L,S}$) e na câmara recetora ($L_{L,R}$), os níveis de pressão sonora, para uma posição de fonte de sons aéreos ligada na câmara emissora.

A próxima etapa passa pela medição do ruído de fundo existente na câmara recetora. Para tal, todas as fontes permanecem desligadas. O valor medido do ruído de fundo, por banda de frequência, irá servir de fator corretivo para os níveis sonoros médios determinados na câmara recetora.

Quando a diferença entre os níveis sonoros médios determinados, para a fonte de percussão e de ruído aéreo, é superior ou igual a 15 dB não é necessária qualquer correção. Quando a diferença é inferior a 6 dB aplica-se um fator corretivo de 1.3 dB.

Por fim, quando a diferença é inferior a 15 dB ou superior ou igual a 6 dB, o nível sonoro médio é corrigido da seguinte forma:

$$L = 10 * \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad (4)$$

Com:

L – nível sonoro médio corrigido para a banda de frequência em análise;

L_{sb} – nível sonoro médio com a fonte sonora em funcionamento e o ruído de fundo;

L_b – nível sonoro médio produzido pelo ruído de fundo;

Por fim, é medido o tempo de reverberação na câmara recetora. Com o valor médio do tempo de reverberação, por banda de frequência, é determinada a área de absorção equivalente:

$$A = 0.16 * \frac{V}{T} \quad (5)$$

Com:

A – área de absorção equivalente (m^2);

V – volume da câmara recetora (m^3);

T – tempo de reverberação médio (s).

No entanto é necessário verificar a necessidade de correção dos níveis de pressão sonora obtidos na câmara recetora obtidos devido à radiação de ruído aéreo pela solução. Essa correção é realizada quando $L_i - (L_{TS} - D) < 10 \text{ dB}$ e é realizada da seguinte forma:

$$L_n = 10 * \log \left(10^{L_i/10} - 10^{(L_{TS}-D)/10} \right) + 10 * \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (6)$$

onde:

$$D = L_{LS} - L_{LR} \quad (7)$$

com:

L_{TS} – níveis de pressão sonora médios para as fontes de percussão, na câmara recetora;

L_{LS} – níveis de pressão sonora obtidos para a fonte de sons aéreos, na câmara emissora;

L_{LR} – níveis de pressão sonora obtidos para a fonte de sons aéreos, na câmara emissora;

A – área de absorção equivalente por banda de frequência (m^2);

A_0 – área de absorção equivalente de referência ($10 m^2$).

3.3.3.2 Bola de Impacto

O Anexo A da norma ISO 10140-3:2010 especifica um método alternativo para a medição de níveis de pressão sonora de impacto para os impactos leves e pesados.

Os métodos de obtenção dos valores de tempo de reverberação e dos níveis de ruído de fundo, bem como a correção dos níveis obtidos na câmara recetora, são realizados seguindo os procedimentos indicados para as fontes de impacto analisadas anteriormente.

Seguindo as indicações do Anexo, medem-se os níveis de pressão sonora máximos, na câmara recetora, para as posições de microfones selecionadas, para cada uma das posições de fonte de impacto escolhidas. O nível sonoro máximo para cada posição de fonte sonora é determinado usando a seguinte fórmula:

$$L_{i,F,max,j} = 10 * \log \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m 10^{L_{F,max,k}/10} \right) \quad (7)$$

com:

$L_{F,max,k}$ – nível de pressão sonora máximo na posição de microfone k , colocado na câmara recetora, por banda de frequência;

m – número de posições de microfones selecionadas;

$L_{i,F,max,j}$ – nível de pressão sonora máximo para a posição de fonte sonora j.

De seguida determinam-se os níveis de pressão sonora médios para a câmara recetora:

$$L_{i,F,max} = 10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_{i,F,max,j}/10} \right) \quad (8)$$

com:

$L_{i,F,max,j}$ – nível de pressão sonora máximo para a posição de fonte sonora j, na câmara recetora, por banda de frequência;

n – número de posições de fonte de percussão;

$L_{i,F,max}$ – nível médio de pressão sonora máximo na câmara recetora.

Por fim, o nível médio de pressão sonora máximo na câmara recetora é padronizado, por frequência, com base no volume da câmara recetora e nos tempos de reverberação obtidos para a mesma, com recurso à seguinte fórmula:

$$L'_{i,F,max,V,T} = L_{i,F,max} * \log \left(\frac{V}{V_0} \right) - 10 * \log \left[\frac{1-C_0^{-1}}{1-C^{-1}} \left(\frac{C^{(1-C)^{-1}} - C^{-(1-C^{-1})^{-1}}}{C_0^{(1-C_0)^{-1}} - C_0^{-(1-C_0^{-1})^{-1}}} \right) \right] \quad (9)$$

onde:

$$C_0 = \frac{T_0}{1.7275}$$

$$C = \frac{T}{1.7275}$$

com:

T – tempo de reverberação, por frequência, na câmara recetora;

T_0 – tempo de reverberação, para habitações, $T_0 = 0.5s$;

V – volume da câmara recetora, em m^3 ;

V_0 – volume de referência para a câmara recetora, para habitações, $V_0 = 50\text{m}^3$.

3.3.3.3 Atividade Humana

Devido à presença de um indivíduo na câmara emissora, para a determinação do isolamento a sons de percussão para o ruído provocado pela atividade humana, apenas foram consideradas medições na câmara recetora, não considerando qualquer tipo de correção devido à transmissão de sons aéreos radiados pela fonte.

Devido a essa limitação na realização do ensaio, descrita acima, os ensaios e o tratamento dos resultados foram realizados de forma semelhante aos procedimentos descritos no subcapítulo 3.2.3.1 sem a medição de níveis de pressão sonora para a fonte de sons aéreos e para a fonte de ruído de impacto na câmara recetora.

3.4 Soluções Construtivas Ensaaiadas

Para a avaliação dos níveis de pressão sonora e isolamento a sons de percussão das diversas fontes foram selecionados diferentes tipos de lajes que poderão estar presentes nos edifícios e diferentes tipos de solução de reforço acústico.

Foram selecionadas três lajes de suporte com constituição distinta: uma laje de betão armado com 14 cm de espessura (Figura 3.9 a)), uma laje aligeirada de vigotas e abobadilhas cerâmicas (Figura 3.9 b)) e, ainda, uma laje de madeira (Figura 3.9 c)). Estas lajes pré-fabricadas estavam disponíveis no laboratório e podem representar diferentes tipos de soluções construtivas de pavimentos, existentes nos edifícios, embora a sua espessura possa ser variável na construção.



a)

b)

c)

Figura 3.9 – Lajes de suporte selecionadas: a) Laje de betão armado; b) Laje de vigotas e abobadilhas cerâmicas; c) Laje de madeira.

Escolheram-se soluções de reforço acústico que podem ser usadas em construção nova ou até em situações de reabilitação. Devido às diferentes características físicas das soluções de suporte, as soluções de reforço acústico não foram as mesmas para as três lajes selecionadas.

Para a laje de betão armado foram selecionadas uma solução de reforço leve e outra pesada. A solução de reforço leve consiste na colocação de um pavimento laminado flutuante sobre um uma camada resiliente com 1.8 mm de espessura e a solução de reforço pesada consiste na colocação de uma manta resiliente perfilada com 8/4 mm de espessura (8mm de espessura máxima e 4 mm de espessura mínima) com uma lajeta de betão com 5 cm de espessura.

Para as lajes aligeirada e de madeira, foram selecionadas duas soluções de reforço leves. Para além da solução utilizada para a laje de betão, aplicação de pavimento flutuante sobre uma manta resiliente de 1.8 mm, foi também selecionada uma solução composta por apoios resilientes discretos e uma camada de OSB, com a colocação de lã mineral na caixa-de-ar.

Uma vez que no âmbito do presente trabalho, o objetivo é estudar o efeito da fonte sonora e não tanto a solução construtiva, os materiais foram escolhidos de entre os que estavam disponíveis no laboratório de maneira a poder ensaiar pelo menos duas soluções com cada laje. A Tabela 3.1 apresenta, de forma resumida, as soluções construtivas e os respetivos reforços acústicos utilizados em cada laje de suporte.

Tabela 3.1 – Resumo das soluções de reforço por tipo de laje de suporte

	S/ Reforço acústico	Camada Resiliente + flutuante	Camada resiliente + lajeta	Apoios resilientes discretos + lã mineral + OSB
Laje de betão armado	S1	S4	S5	-
Laje de vigotas e abobadilhas	S2	S6	-	S7
Laje de madeira	S3	S8	-	S9

Na Figura 3.10 apresentam-se alguns pormenores das soluções construtivas ensaiadas.

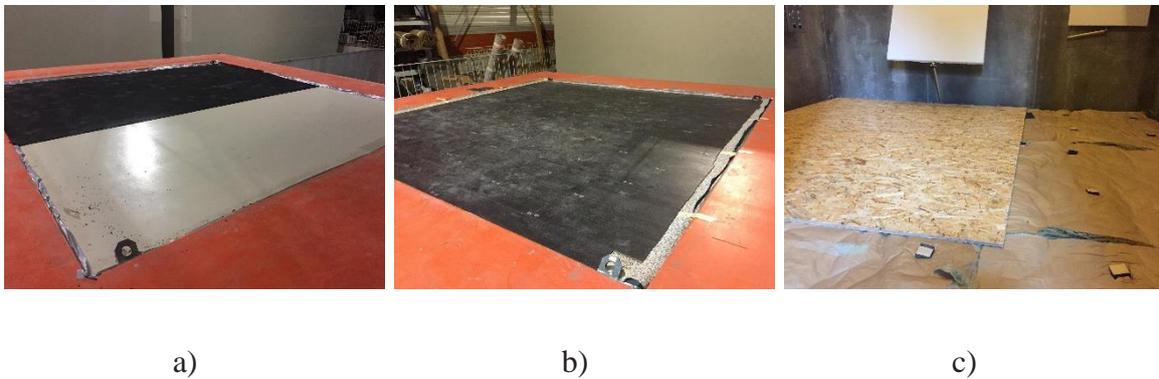


Figura 3.10 – Exemplo de montagem dos reforços acústicos nos diferentes tipos de laje:
a) Colocação da camada resiliente na laje de betão armado; b) camada resiliente com a colocação de pavimento flutuante como acabamento final; c) colocação da camada de OSB sobre os apoios resilientes discretos, com lã mineral na caixa-de-ar.

4 Apresentação e análise de resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para as várias soluções construtivas ensaiadas quando solicitadas pelas fontes descritas na secção 3.4. Desta forma, são apresentadas para as fontes de percussão normalizada, modificada e atividade humana são apresentados os valores obtidos para o isolamento a sons de percussão em bandas de terço de oitava compreendidos entre os 50 Hz e os 5000 Hz.

De referir que, apesar das indicações do anexo A da norma ISO 10140-3:2010, indicar que as medições e respetivos resultados devam ser determinados em bandas de terço de oitava compreendidos entre os 50 Hz e os 630 Hz, os ensaios foram realizados dos 50 Hz aos 5000Hz.

Em primeiro lugar serão apresentados e comentados os diferentes tipos de comportamento das diferentes fontes de impacto, consoante a laje de suporte e respetivos reforços acústicos. De seguida serão apresentadas as correlações obtidas para as fontes Atividade Humana e Bola de Impacto, para as restantes fontes de impacto, para todas as soluções construtivas, para as bandas de frequência de 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz.

É de salientar que os resultados apresentados não consideram a correção dos níveis de pressão sonora medidos devido à transmissão de sons aéreos radiado pelas soluções construtivas para uma comparação mais coerente entre as diferentes fontes de impacto.

4.2 Análise de Resultados por solução construtiva

Nas subsecções seguintes são apresentados os níveis sonoros de percussão normalizados [L_n (dB)] originados pela máquina de percussão normalizada, pela máquina de percussão modificada e pela atividade humana, e são ainda apresentados os níveis de pressão sonora máximos normalizados originados pela bola de impacto. Os gráficos apresentam dois eixos verticais um para representar os valores de L_n e outro para representar os valores de $L_{F, Max;V,T}$

Atendendo a que no ensaio com a bola de impacto se medem valores máximos e se obtêm um parâmetro distinto do parâmetro L_n , tentou avaliar-se qual seria o valor correspondente de L_n gerado por impactos consecutivos da bola de impacto. Para o efeito, foram registados os níveis sonoros, durante o mesmo intervalo de tempo usado para as outras fontes, para impactos repetidos e consecutivos da bola de impacto com uma cadência regular relativos à queda de 1m de altura.

O ensaio foi realizado com a bola de impacto, na laje de betão sem revestimentos usando a metodologia preconizada pela norma para a bola e a metodologia preconizada para a máquina de percussão.

Na Figura 4.1 apresentam-se os valores de L_n e de $L_{F, Max;V,T}$ obtidos em bandas de terços de oitava desde os 50 Hz aos 5000 Hz. Verifica-se que as curvas respeitantes aos dois parâmetros são bastante próximas, o que, de certa forma, em termos energéticos permitirá comparar os resultados obtidos com esta fonte com os obtidos com as outras fontes.

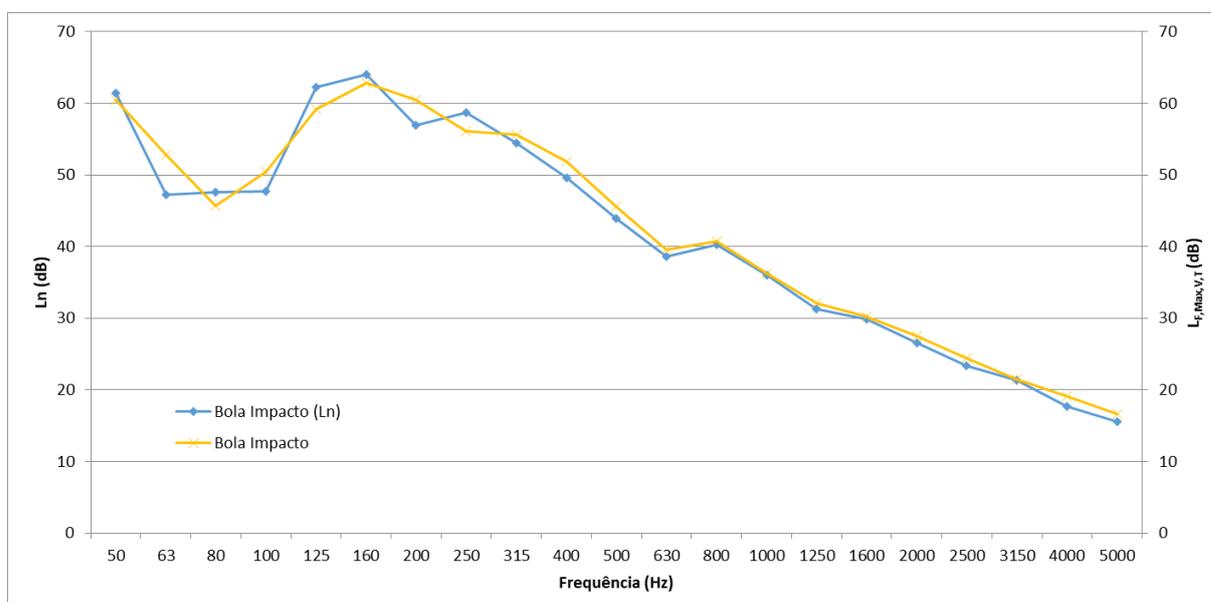


Figura 4.1 – Comparação entre os níveis sonoros de percussão normalizados e os níveis de pressão sonora máximos gerados pela bola de impacto na laje de betão sem revestimento.

4.2.1 Laje de Betão Armado

De seguida apresentam-se os níveis sonoros de percussão normalizados obtidos com as máquinas de percussão normalizada e modificada, a atividade humana e os níveis de pressão sonora máximos para a bola de impacto para as soluções construtivas que incluem a laje de betão armado.

Na Figura 4.2 são apresentados os níveis sonoros de percussão normalizados obtidos com a máquina de percussão normalizada (MPN), máquina de percussão modificada (MPM) e com a atividade humana, e os níveis de pressão sonora máximos normalizados para a bola de impacto, para a laje de betão armado.

Observa-se que a MPN é a fonte que gera mais energia nas bandas de frequências mais altas. Relativamente ao restante espectro é a fonte que gera níveis sonoros superiores relativamente às outras fontes, excetuando a banda dos 50 Hz.

Comparando as fontes MPM e atividade humana verifica-se que são aquelas que dão origem a curvas de níveis sonoros de percussão normalizados mais próximos. Para bandas de frequência mais baixas a MPM gera níveis sonoros mais elevados, nomeadamente para as bandas de frequência entre os 50 Hz e 160 Hz. Para frequências mais elevadas, bandas de frequência superiores a 1000 Hz, a MPM gera níveis sonoros mais reduzidos. No entanto, as diferenças entre estas duas fontes são mais notórias nas baixas frequências, nomeadamente nas bandas de um terço de oitava dos 50, 63 e 80 Hz.

Analisando os níveis de pressão sonora máximos para a bola de impacto observa-se que estes seguem uma tendência semelhante às duas fontes comparadas anteriormente, no entanto apresenta níveis de pressão sonora máximos normalizados superiores aos níveis sonoros de percussão normalizados das fontes MPM e atividade humana. É ainda a fonte que apresenta um nível mais elevado para a banda dos 50 Hz. Note-se que os parâmetros são diferentes, mas atendendo à figura 4.1 toma-se a liberdade de os comparar.

De seguida foi acrescentada uma camada resiliente sob uma camada de pavimento flutuante como acabamento final. Na Figura 4.3 encontram-se representados os níveis sonoros obtidos para as quatro fontes em análise.

Observa-se que a MPN, na maioria do espectro, gera níveis sonoros superiores relativamente às restantes fontes. Verifica-se uma aproximação dos níveis sonoros

obtidos com a fonte MPN com os níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto, principalmente para as frequências mais altas. Para as frequências mais baixas, a bola de impacto é a fonte que dá origem a níveis sonoros superiores para a banda de frequência dos 50 Hz. Os níveis sonoros gerados pela bola de impacto são consideravelmente maiores que os níveis gerados pelas MPM e atividade humana.

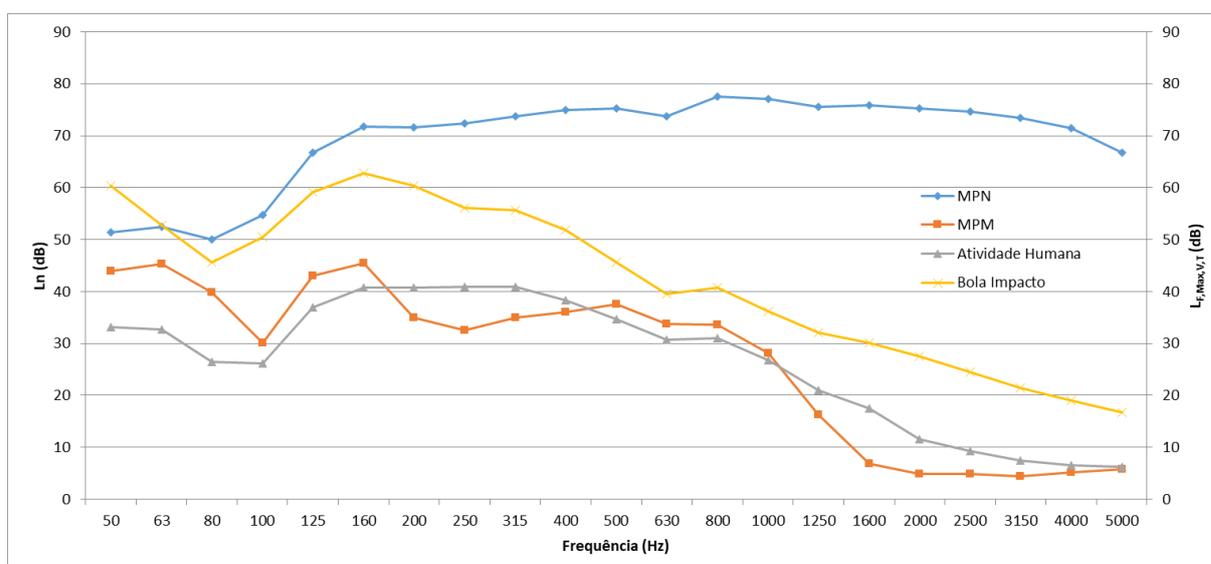


Figura 4.2 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado

Comparando as duas fontes restantes observa-se que existe uma aproximação dos níveis sonoros gerados pelas duas, com principal destaque para frequências superiores à banda de frequência dos 1250 Hz.

Por fim, foi aplicada uma camada resiliente com a colocação de uma lajeta em betão sobre a laje de betão armado. Os resultados obtidos para os níveis sonoros e níveis sonoros máximos são apresentados na Figura 4.4.

Analisando a curva de níveis sonoros obtidos para o ensaio com a máquina de percussão normalizada verifica-se que para bandas de frequências mais baixas, bandas de frequência inferiores a 125 Hz, inclusive, a MPN apresenta níveis sonoros próximos dos níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto e até mesmo níveis sonoros próximos aos níveis sonoros obtidos para a MPM na banda de frequência dos 50 Hz

Para as bandas dos 50 e dos 63 Hz, os níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto são superiores aos níveis sonoros obtidos com a MPN.

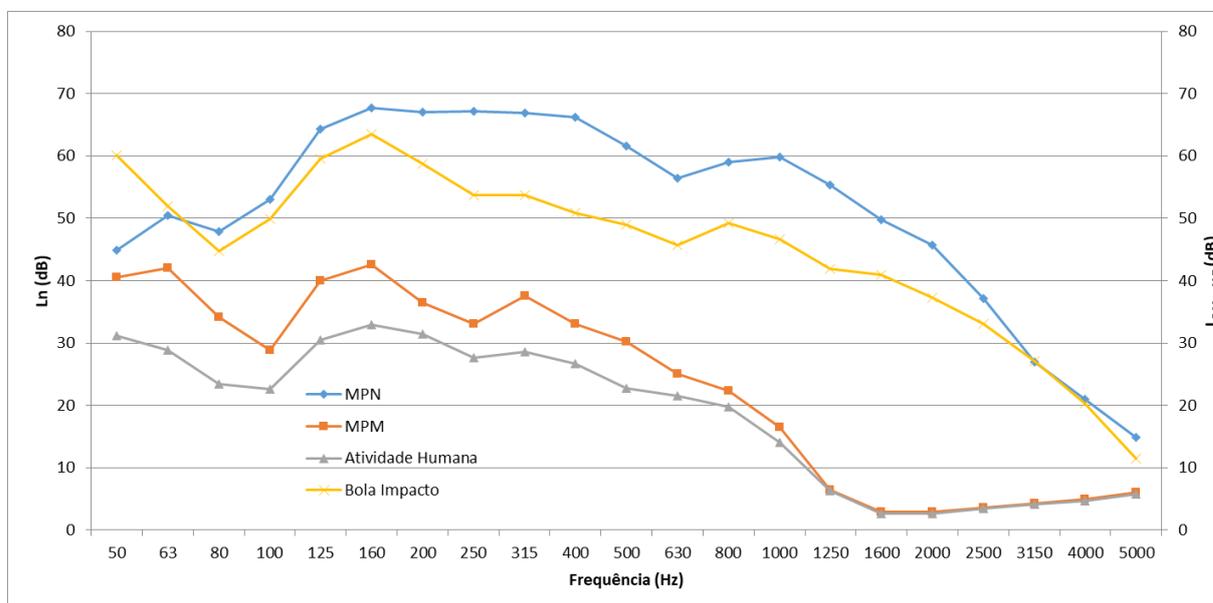


Figura 4.3 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.

Observando a Figura 4.4 verifica-se que os níveis sonoros obtidos com a MPM e a atividade humana apresentam valores bastante semelhantes e apresentam uma curva de níveis sonoros por frequência que seguem a mesma tendência de comportamento, apesar de a MPM originar, na maior parte das frequências, níveis superiores.

Verifica-se ainda que a variação ao longo da frequência dos níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto apresenta uma tendência semelhante à obtida com as fontes MPM e atividade humana, apesar de se apresentar níveis sonoros superiores. Nas bandas de frequência superiores a 1250 Hz, as três fontes apresentam níveis sonoros muito semelhantes entre si.

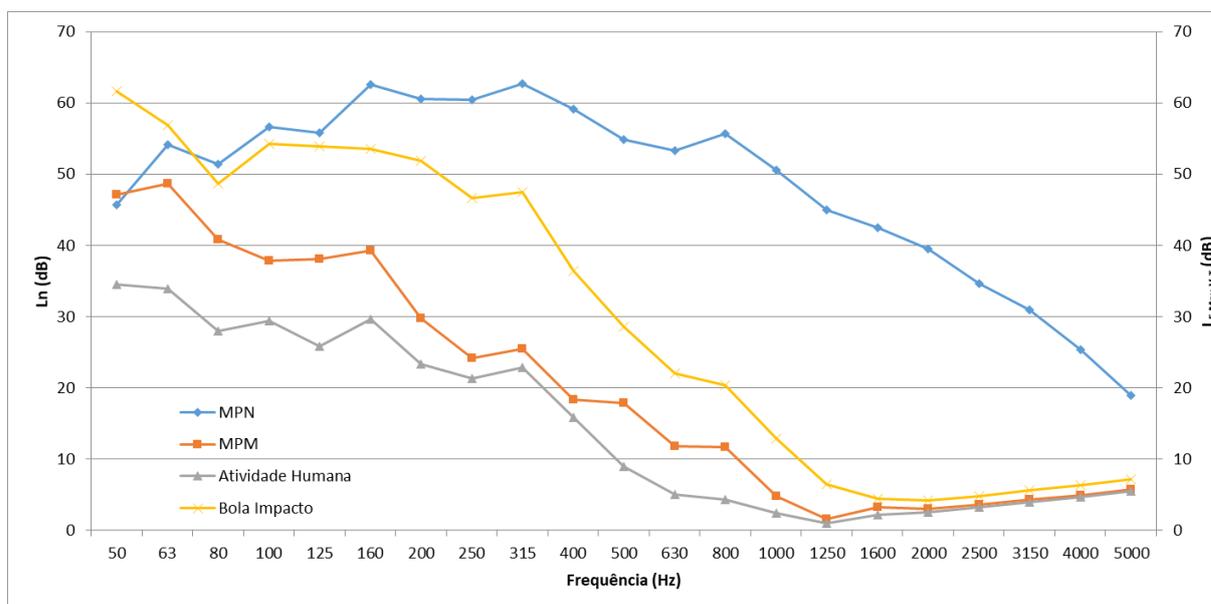


Figura 4.4 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de betão armado reforçada com uma camada de material resiliente e uma lajeta flutuante como acabamento final.

4.2.2 Laje de Vigotas

Nesta secção compara-se os resultados obtidos com as soluções construtivas que incluem a laje de vigotas e abobadilhas.

Em primeiro lugar ensaiou-se a laje de vigotas sem qualquer reforço acústico usando as quatro fontes em análise e foram determinados os respetivos parâmetros (Figura 4.5).

Observando a Figura 4.5 verifica-se que a fonte MPN gera maiores níveis sonoros do que as restantes fontes a partir da banda de frequência dos 125 Hz. Para bandas de frequência inferiores a 125 Hz apresenta níveis sonoros semelhantes às fontes MPN e bola de impacto.

A atividade humana gera os níveis sonoros mais reduzidos para todo o espectro de frequência em análise.

Comparando os níveis sonoros gerados pela MPM e os níveis sonoros máximos gerados pela bola de impacto verifica-se que apresentam valores muito próximos entre eles para o espectro em análise. Observa-se que para a banda de frequência dos 50 Hz a bola de impacto gera níveis sonoros superiores mas para bandas de frequência compreendidas

entre os 630 e os 1250 Hz a bola de impacto origina níveis sonoros máximos inferiores aos níveis sonoros obtidos com a MPM.

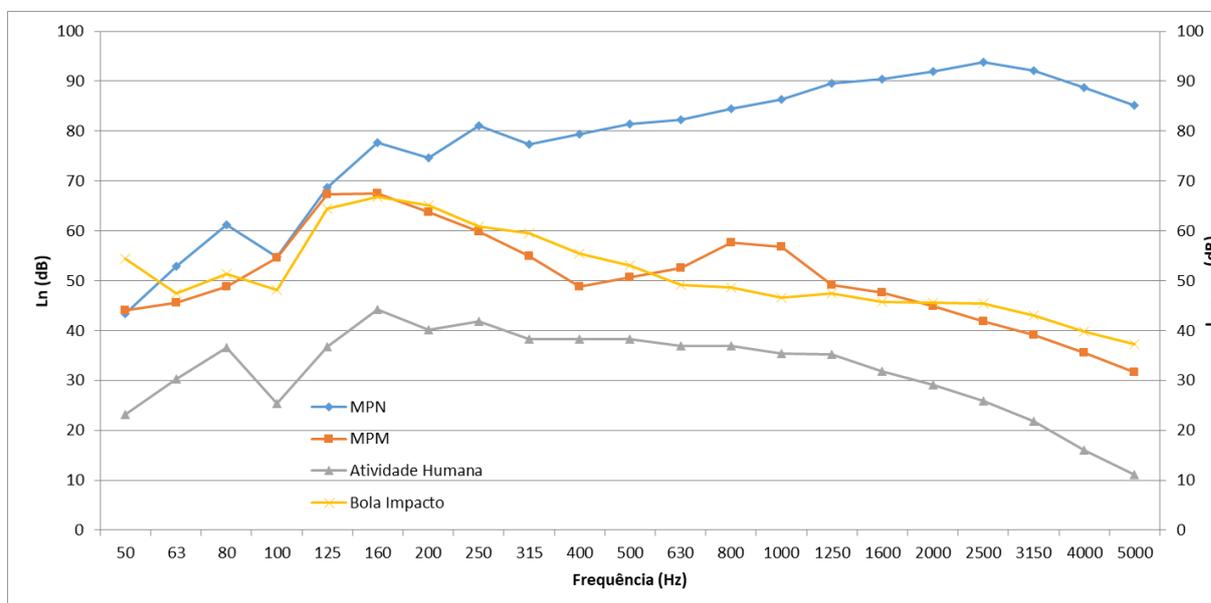


Figura 4.5 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas.

Apresentam-se, na Figura 4.6 os níveis sonoros determinados para a laje de vigotas reforçada com uma camada resiliente sob um pavimento flutuante.

Analisando os níveis sonoros obtidos com a fonte MPN observa-se que, para as bandas de frequência com início nos 63 Hz e fim nos 1000 Hz, a fonte MPN apresenta os níveis sonoros normalizados superiores às restantes fontes, mas com valores relativamente semelhantes aos níveis sonoros obtidos com a bola de impacto. Para o restante espectro, ou seja, para a banda de um terço de oitava dos 50 Hz e para as bandas de frequência dos 1250 Hz até aos 5000 Hz, os níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto apresentam valores superiores aos obtidos com a MPN.

Comparando as fontes MPM e atividade humana é notória que os resultados obtidos com ambas as fontes apresentam uma tendência, comportamento, bastante semelhante, principalmente para as bandas de um terço de oitava superiores a 800 Hz.

Por fim foi reforçada acusticamente a laje de vigotas com a colocação de uma malha de apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB, com aplicação de lã mineral na

caixa-de-ar. Esta solução foi ensaiada com as quatro fontes em análise obtendo-se os níveis sonoros ilustrados na Figura 4.7.

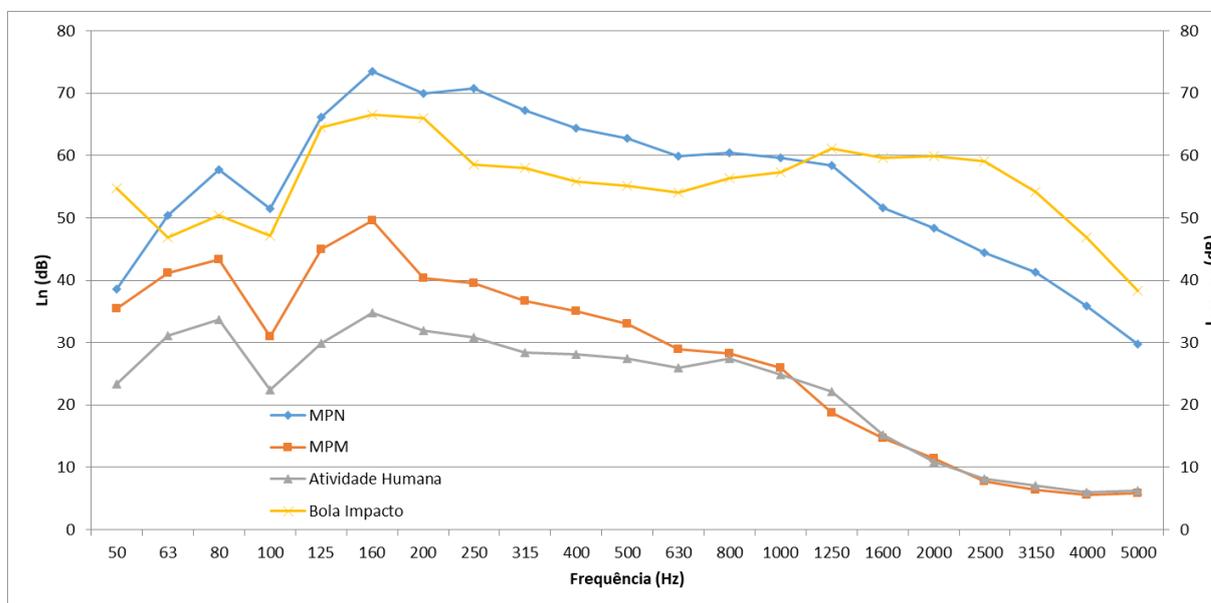


Figura 4.6 – Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.

Pela análise da Figura 4.7 observa-se que a fonte MPN gera níveis sonoros de percussão normalizados superiores aos obtidos com as restantes fontes em análise, para bandas de frequência superiores a 125 Hz. Para bandas de frequência inferiores aos 125 Hz os níveis sonoros obtidos no ensaio com a fonte MPN aproximam-se dos níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto exceto na banda de frequência dos 50 Hz, na qual o nível sonoro máximo obtido com a bola de impacto é consideravelmente superior aos níveis sonoros obtidos com as restantes fontes.

Analisando as fontes MPM e atividade humana é notória a aproximação que existe entre os resultados obtidos com as duas fontes, apesar da fonte MPM gerar níveis sonoros ligeiramente superiores aos níveis sonoros obtidos com a fonte atividade humana.

Comparando os resultados obtidos com a bola de impacto com os obtidos com as fontes MPM e atividade humana, também se observa uma tendência semelhante para as três fontes. No entanto, os níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto são consideravelmente superiores aos níveis sonoros obtidos com as restantes fontes.

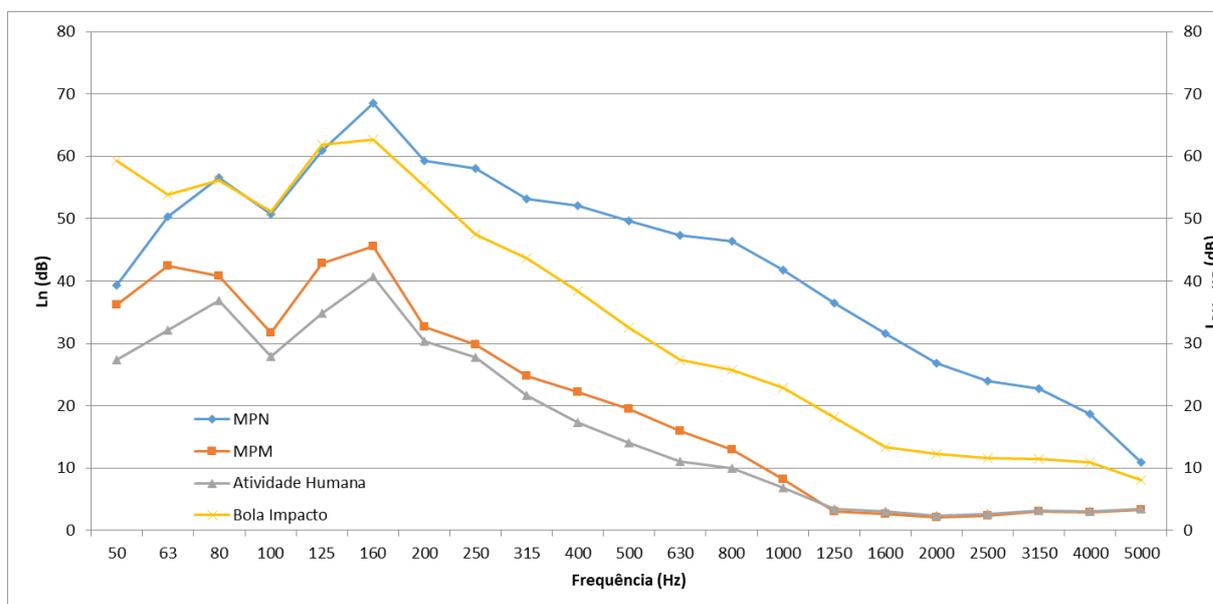


Figura 4.7 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de vigotas reforçada com apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB com lã mineral na caixa-de-ar.

4.2.3 Laje de Madeira

Por fim apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios das soluções compostas pela laje de madeira e respetivos reforços acústicos. Na Figura 4.8 são apresentados os resultados respeitantes à laje de madeira obtidos com as diferentes fontes de percussão em estudo.

Observa-se, na Figura 4.8, que a máquina de percussão normalizada dá origem a níveis sonoros superiores em quase todo o espectro de frequência em análise, com a exceção das bandas de frequência de 50 e 63 Hz. Para essas bandas de frequência, a bola de impacto gera níveis de pressão sonora máximos superiores aos níveis sonoros de percussão normalizados gerados por qualquer outra fonte em análise.

Analisando a curva dos níveis sonoros máximos gerados pela bola de impacto verifica-se que esta segue a mesma tendência que a curva dos níveis da atividade humana, apesar de apresentar níveis sonoros superiores.

As fontes de percussão que geram resultados mais próximos são a MPM e a atividade humana, Apesar de, até aos 1250 Hz, a MPM gerar níveis sonoros superiores.

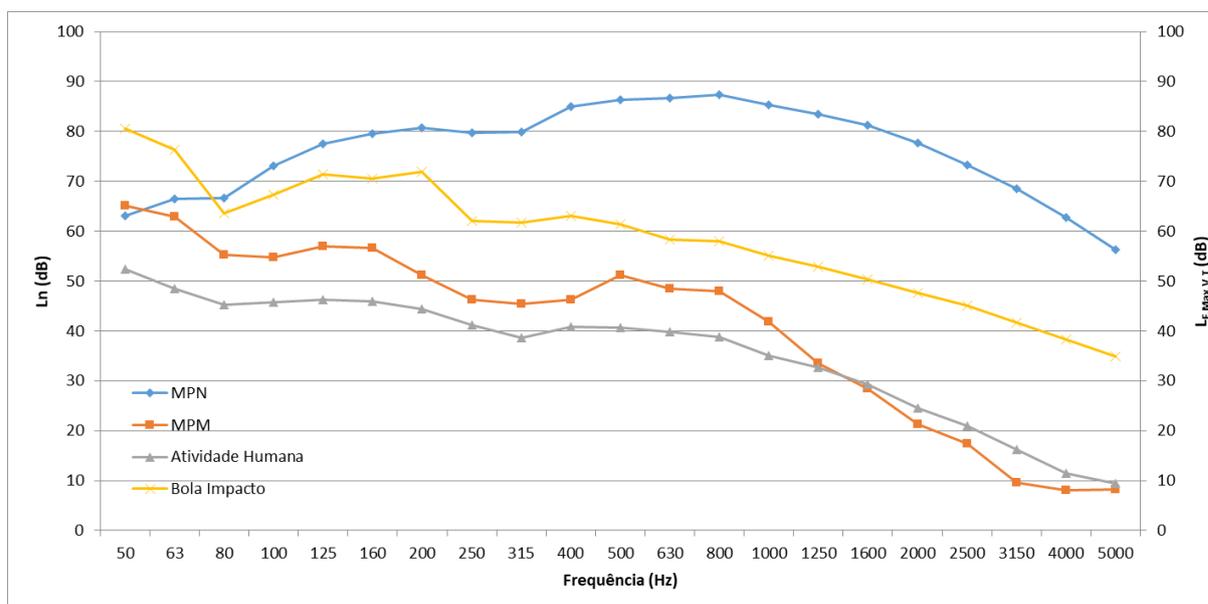


Figura 4.8 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira.

Pela análise da Figura 4.9 observa-se que a bola de impacto, para as bandas de frequência de 50 e 63 Hz, gera níveis sonoros máximos superiores aos níveis sonoros de percussão normalizados originados pelas restantes fontes. Para o restante espectro é observável que, apesar de com a fonte MPN se obterem níveis sonoros superiores aos obtidos com as restantes fontes, os níveis sonoros de percussão normalizados são bastante próximos dos níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto.

Para as fontes restantes, MPM e atividade humana, verifica-se que os resultados obtidos com estas apresentam a mesma tendência, apresentando níveis sonoros muito próximos para as frequências mais altas, nomeadamente a partir dos 1250 Hz, inclusive.

Por fim, a ultima solução a comparar consiste na laje de madeira com a colocação de uma malha de apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB, com aplicação de lã mineral na caixa-de-ar como reforço acústico.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados obtidos com as fontes em análise para a laje de madeira reforçada.

Verifica-se que os resultados que melhor se aproximam são os obtidos com a atividade humana e a MPM. Apesar de a fonte MPM gerar níveis sonoros superiores, para

frequências inferiores a 1250 Hz, observa-se uma tendência na curva muito semelhante à curva dos níveis sonoros gerados pela atividade humana.

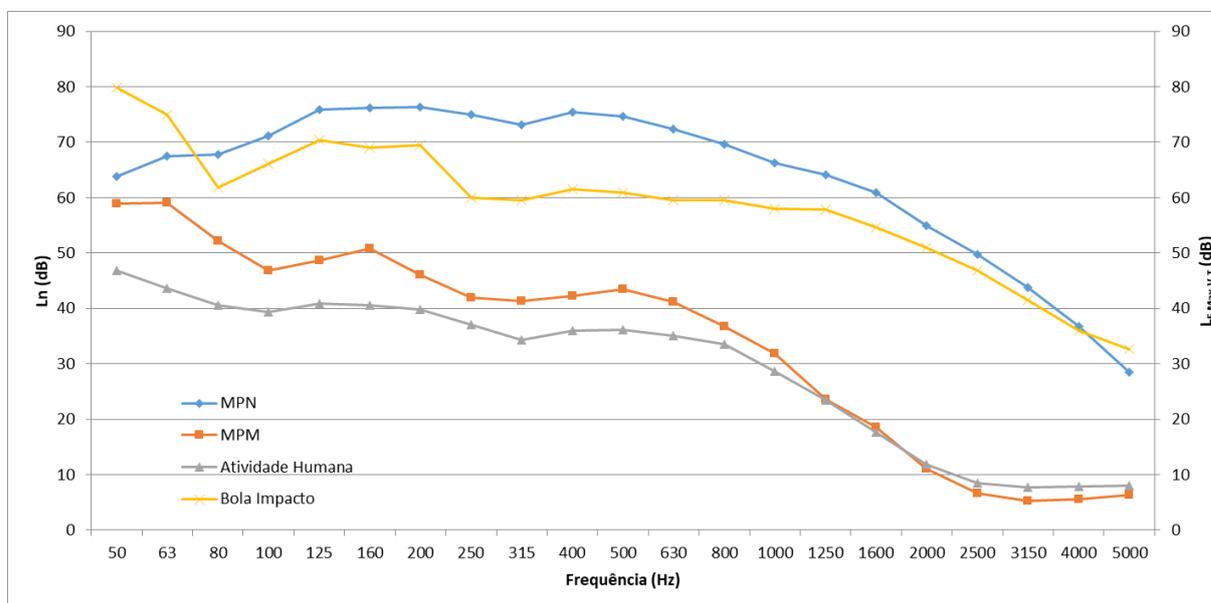


Figura 4.9 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira reforçada com uma camada resiliente e pavimento flutuante como acabamento final.

Analisando os níveis sonoros máximos obtidos com a bola de impacto verifica-se que são superiores relativamente aos obtidos com qualquer outra fonte para as bandas de frequência de 50, 63 e 80 Hz e ainda para frequências mais altas, a partir dos 1600 Hz. Para o restante espectro, a MPN dá origem a níveis sonoros mais altos do que os originados por qualquer outra fonte.

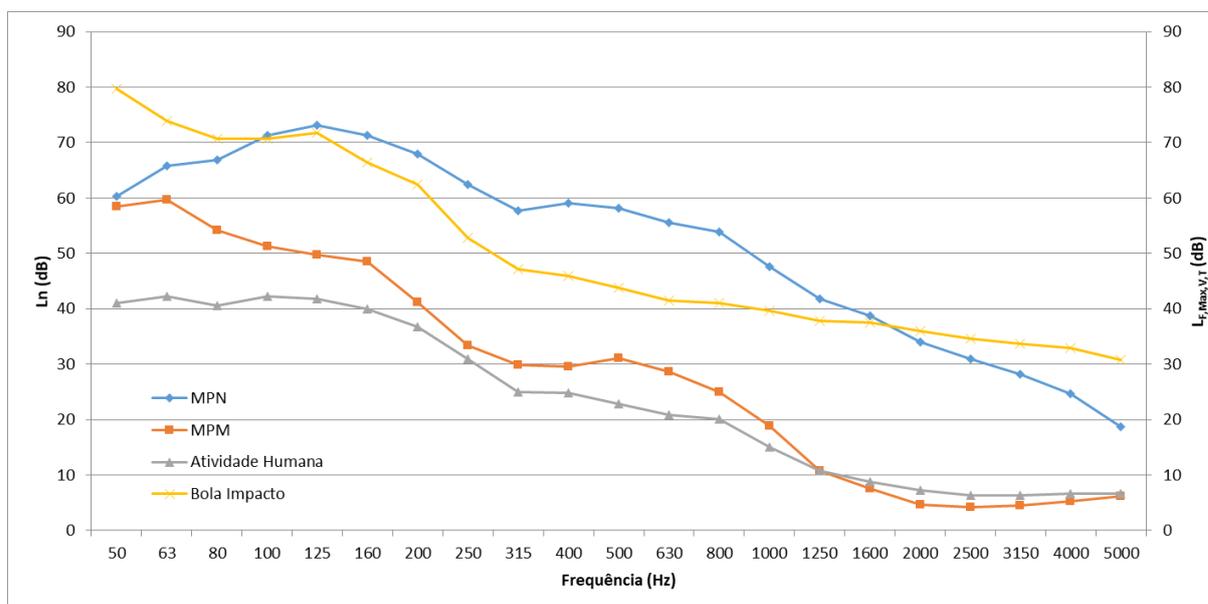


Figura 4.10 - Resultados obtidos com as várias fontes no ensaio da laje de madeira reforçada com apoios resilientes discretos sob uma camada de OSB com lã mineral na caixa-de-ar.

4.3 Correlações dos resultados obtidos com as diferentes fontes

Nesta secção apresenta-se correlações dos resultados gerados por pares de fontes distintas para as bandas das baixas frequências, nomeadamente a banda dos 50, 63 e 80 Hz. Apesar de nas secções anteriores se terem já efetuado comparações da tendência dos resultados obtidos com as várias fontes ao longo da frequência, considera-se que, será interessante, pelo menos nas frequências mais baixas analisadas, estabelecer correlações no sentido de perceber quais as fontes que se correlacionam melhor. A correlação é efetuada através de uma regressão linear simples aplicada a pares de resultados.

As figuras que se seguem apresentam os valores correspondentes de níveis sonoros para as respetivas fontes em comparação, para a totalidade das nove soluções construtivas ensaiadas.

4.3.1 Correlação da bola de Impacto com as restantes fontes

Nas figuras Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 são apresentadas as correlações obtidas entre os níveis sonoros obtidos com a bola de impacto e os níveis sonoros obtidos com as restantes fontes nas diversas soluções ensaiadas. Na Figura 4.11 apresenta-se a correlação obtida na frequência dos 50 Hz. A análise da correlação da

bola de impacto com as outras fontes mostra que os valores de R^2 são 0.8987 quando se analisa a máquina de percussão normalizada, 0.8699 quando se avalia a máquina de percussão modificada e 0.8968 quando se analisa a atividade humana. Ou seja, para a banda de um terço de oitava de 50 Hz, os níveis sonoros obtidos com a bola de impacto apresentam uma melhor proporcionalidade com os níveis sonoros obtidos com a máquina de percussão normalizada.

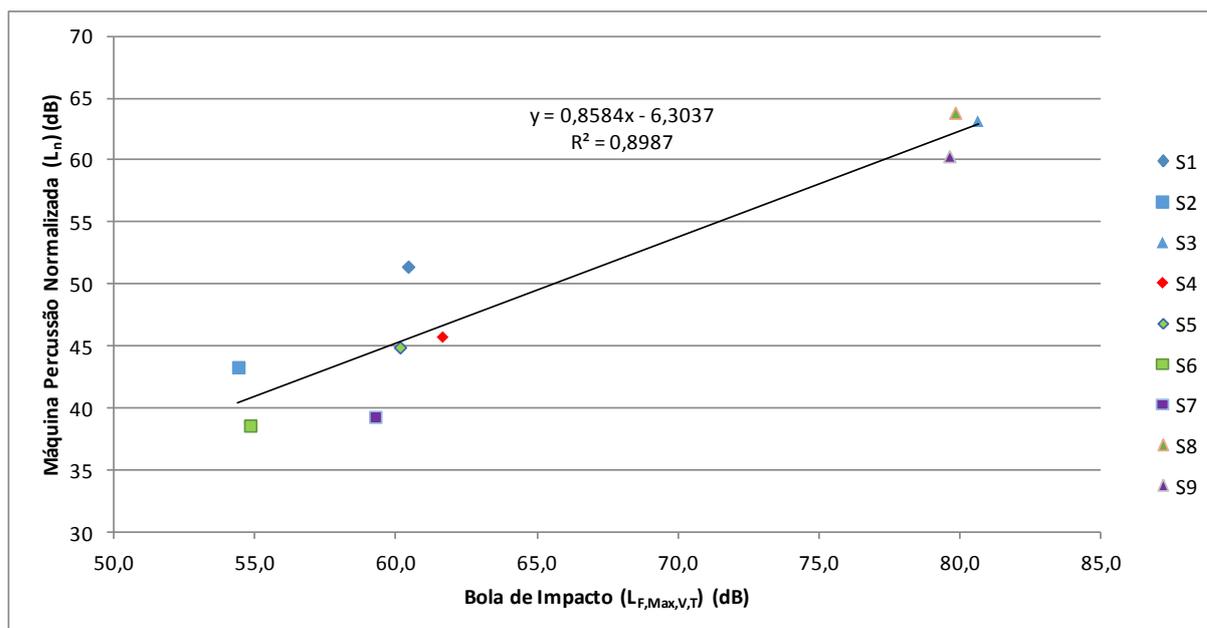


Figura 4.11 – Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 50 Hz.

Nas Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 são apresentadas as correlações obtidas, na banda de um terço de oitava de 63 Hz, entre a bola de impacto e as restantes fontes.

Pela análise efetuada verifica-se que a correlação mais forte acontece para a máquina de percussão normalizada com um valor de R^2 de 0.9357. Pelo contrário, a atividade humana é a fonte que menos se correlaciona com a bola de impacto, apresentando um valor de $R^2=0.9257$. No entanto verificam-se correlações altas para as três fontes em análise.

Por fim são analisadas as correlações entre a bola de impacto e as restantes fontes para a banda de um terço de oitava de 80 Hz.

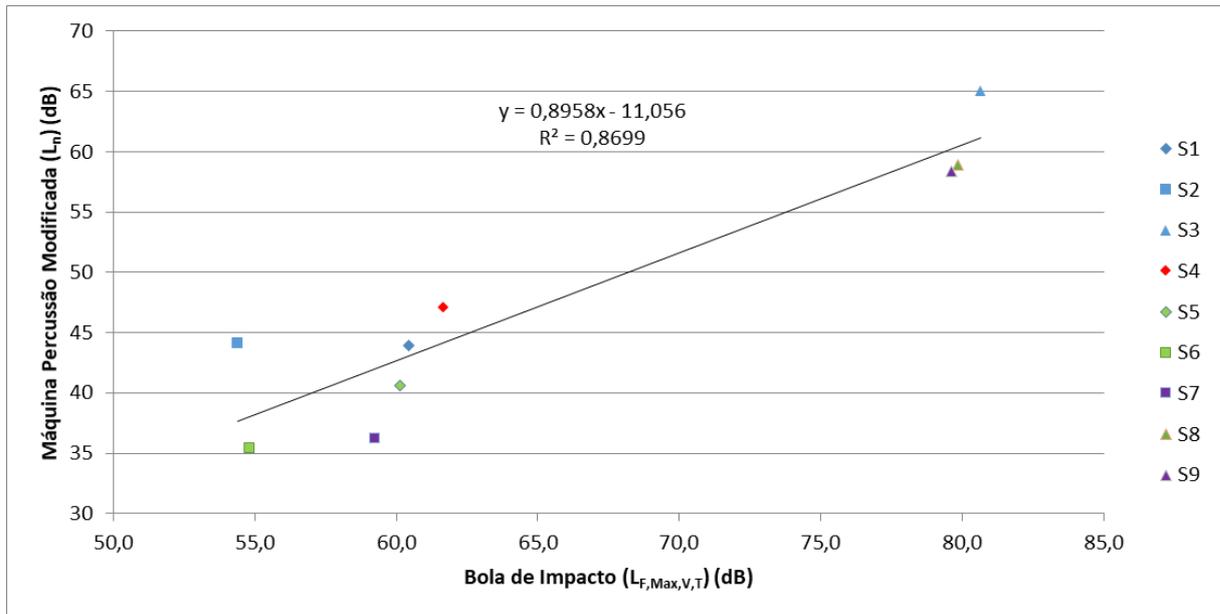


Figura 4.12 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 50 Hz.

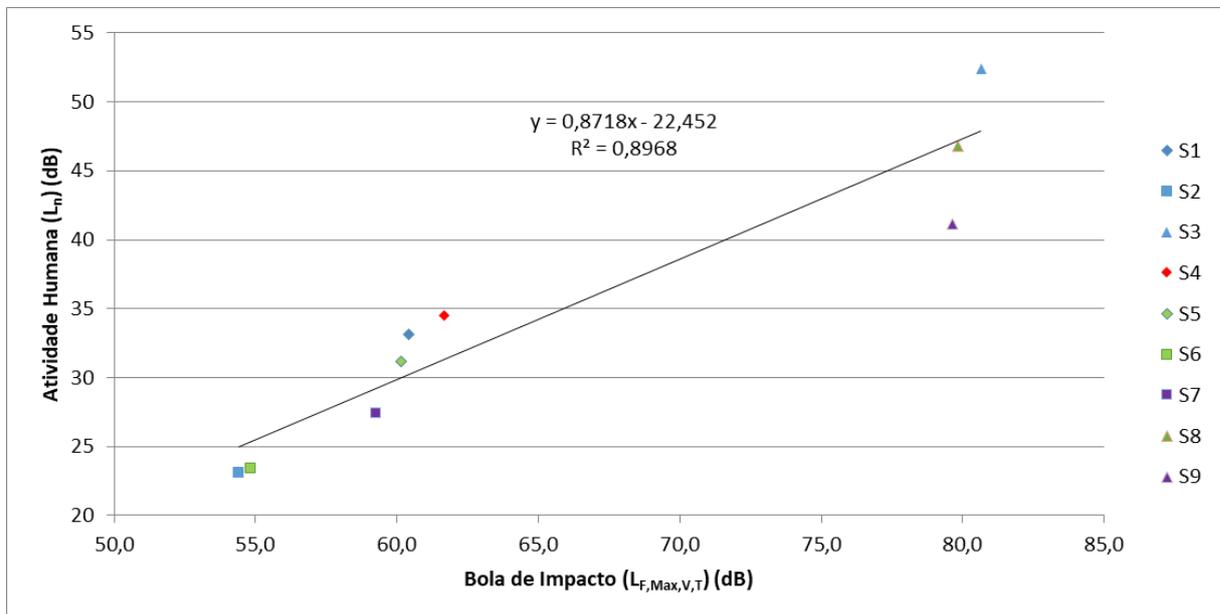


Figura 4.13 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 50 Hz.

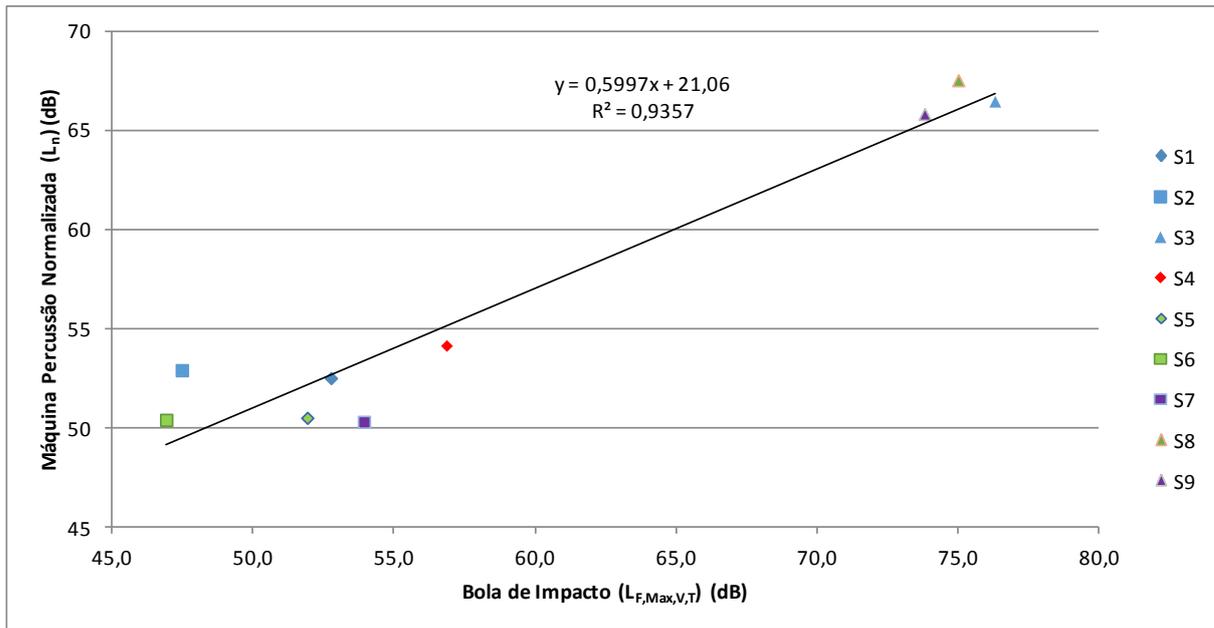


Figura 4.14 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 63 Hz.

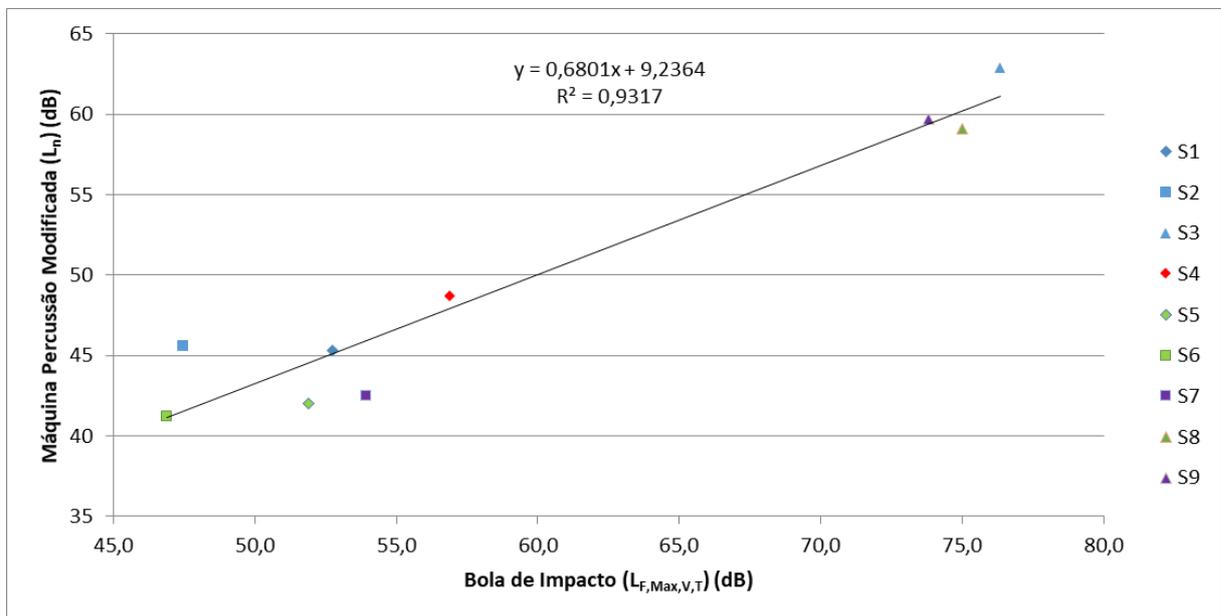


Figura 4.15 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 63 Hz.

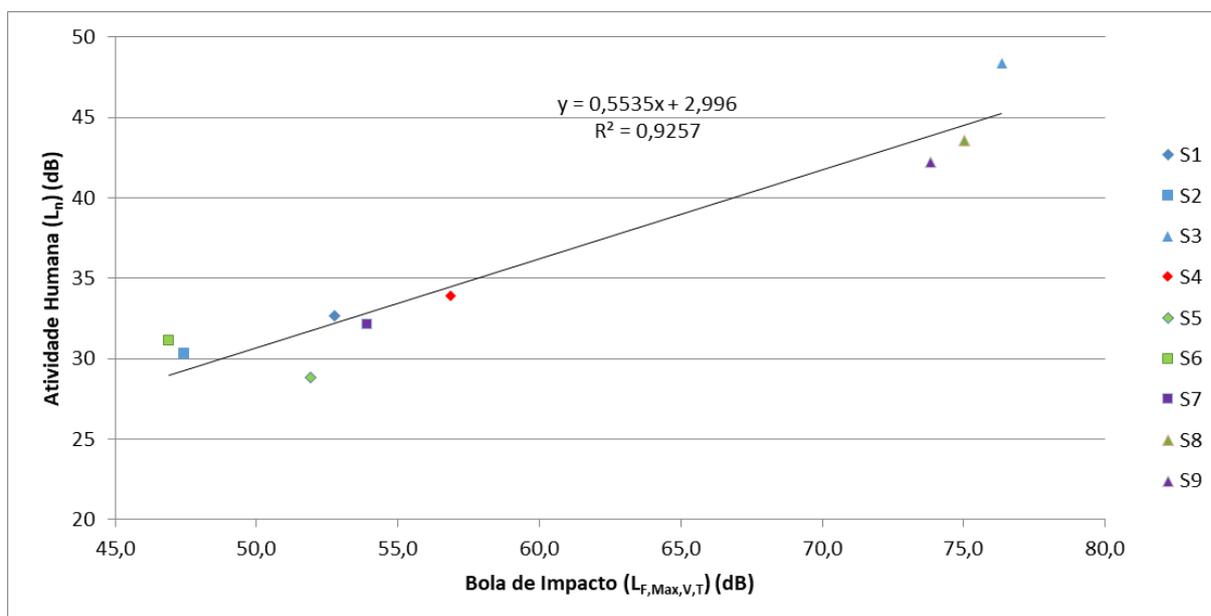


Figura 4.16 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 63 Hz.

Observa-se que a linha de regressão para a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada (Figura 4.17) apresenta um valor de R^2 de 0.7994. Uma vez mais, a máquina de percussão normalizada é a fonte que apresenta maior correlação com a bola de impacto.

Observa-se ainda que a máquina de percussão modificada é a fonte que apresenta menor correlação com a bola de impacto com um $R^2 = 0.7528$. Entre a atividade humana e a bola de impacto obteve-se um valor de R^2 de 0.7688.

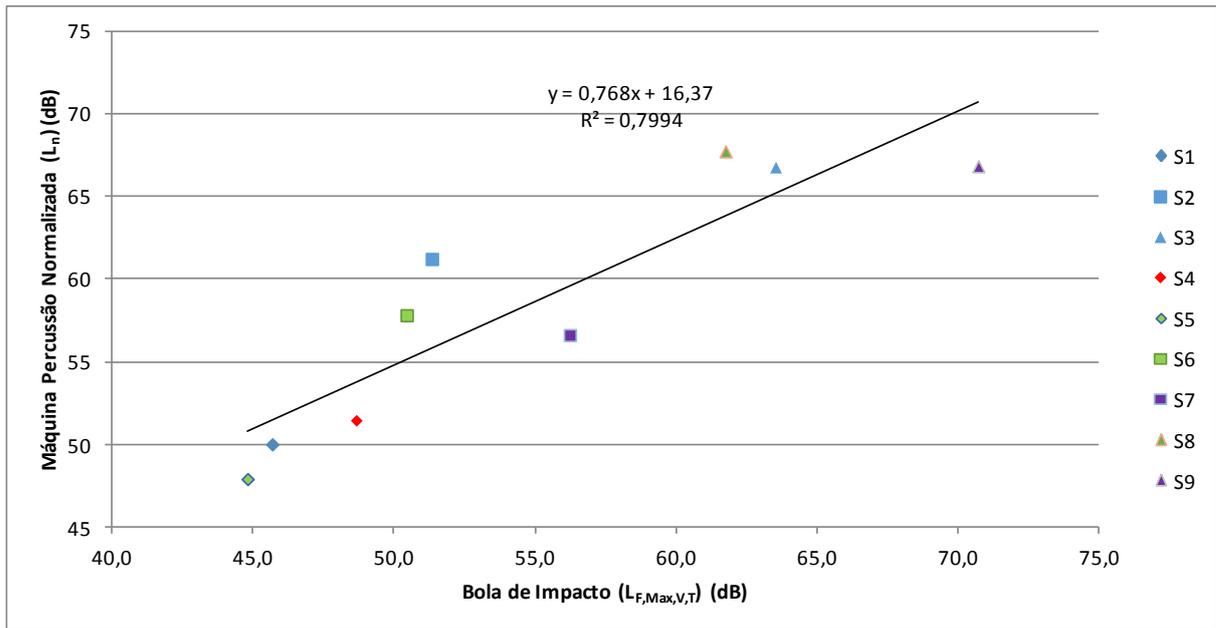


Figura 4.17 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 80 Hz.

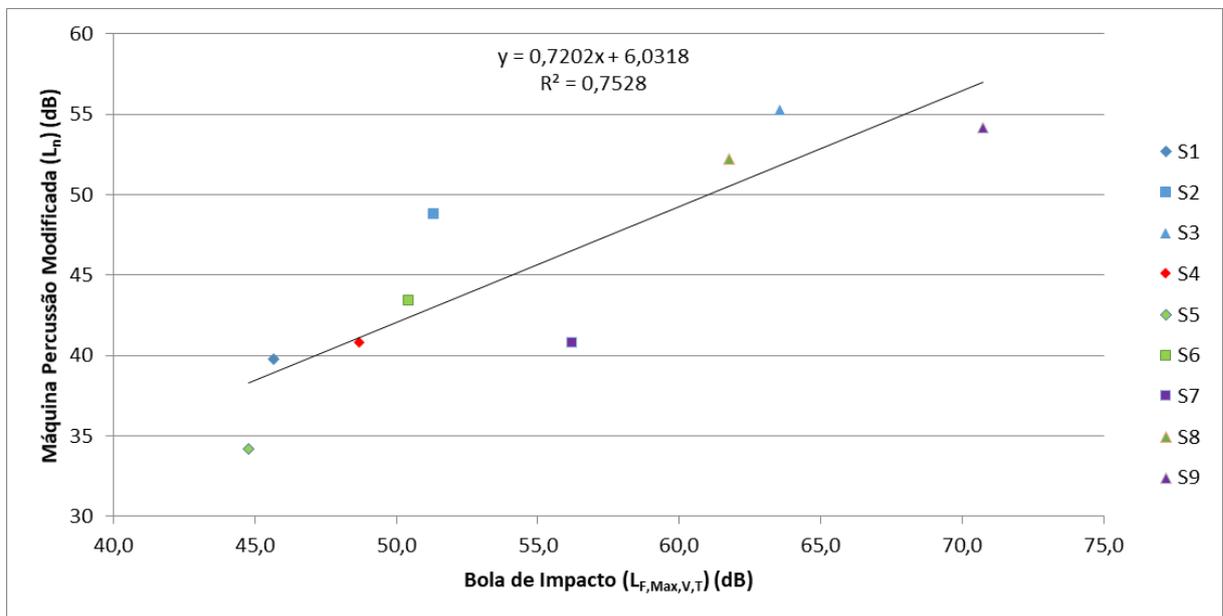


Figura 4.18 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 80 Hz.

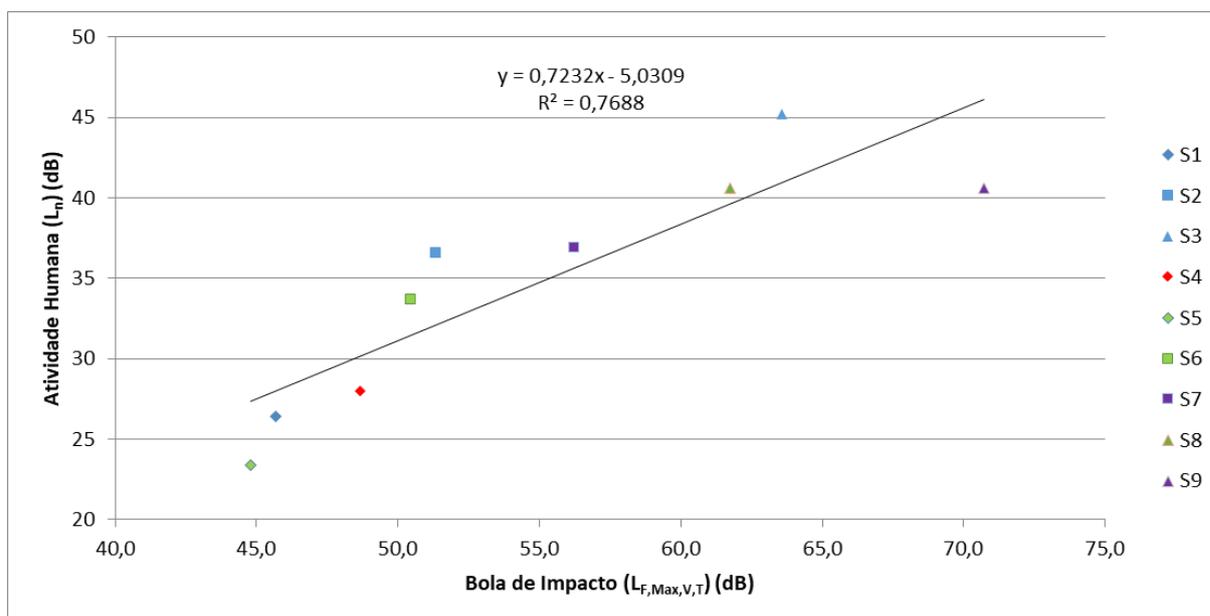


Figura 4.19 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a bola de impacto e a atividade humana para a banda de frequência dos 80 Hz.

4.3.2 Correlação da atividade humana com as restantes fontes

Nesta secção correlacionam-se os níveis sonoros obtidos com a fonte atividade humana com os obtidos para as restantes fontes, para as bandas de um terço de oitava de 50, 63 e 80 Hz.

As figuras Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 apresentam os gráficos de correlação linear obtidos com os níveis gerados pela fonte atividade humana e os obtidos com as fontes máquina de percussão normalizada, máquina de percussão modificada e bola de impacto, respetivamente.

Observando as figuras verifica-se que a bola de impacto é a fonte que melhor se correlaciona com a da atividade humana para a banda de um terço de 50 Hz apresentando um R^2 de 0.8968. A fonte que menos se correlaciona é a máquina de percussão modificada que apresenta um valor de R^2 de 0.8681.

Nas Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25 ilustram-se as correlações obtidas para a banda dos 63 Hz, entre a atividade humana e as fontes máquina de percussão normalizada, máquina de percussão modificada e bola de impacto, respetivamente.

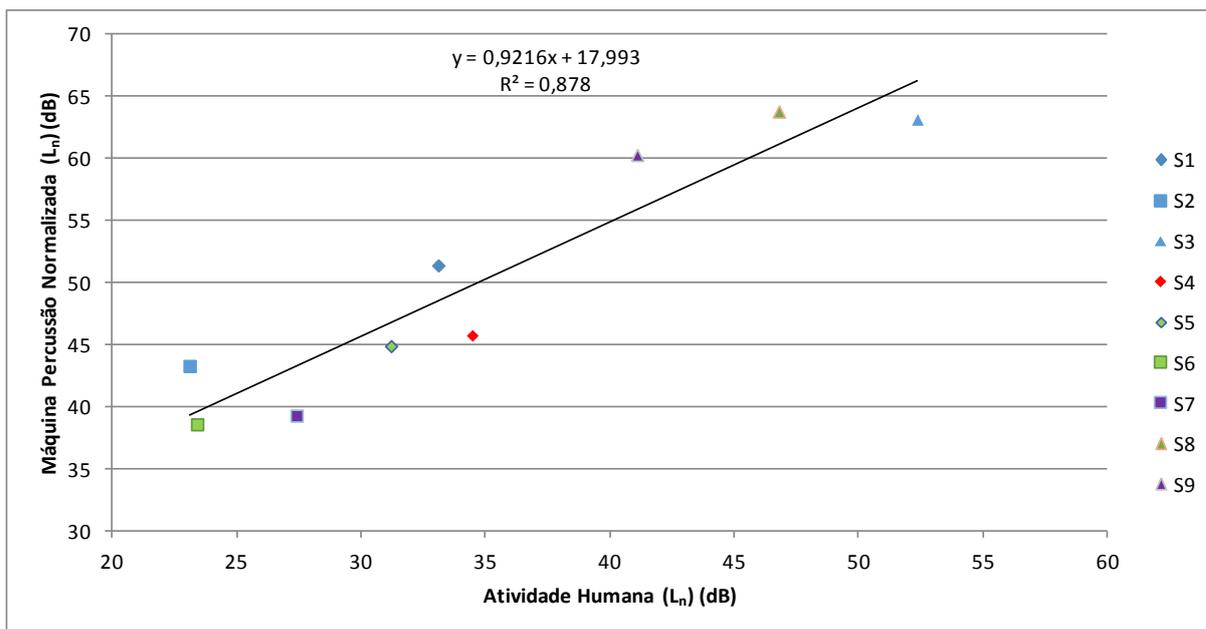


Figura 4.20 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 50 Hz.

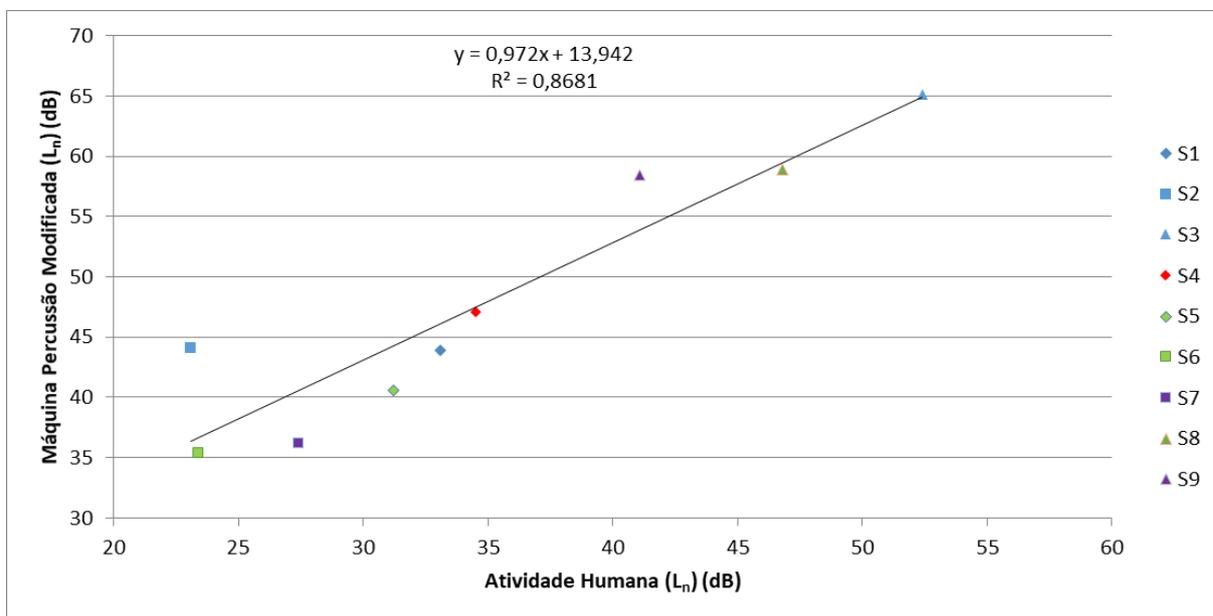


Figura 4.21 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 50 Hz.

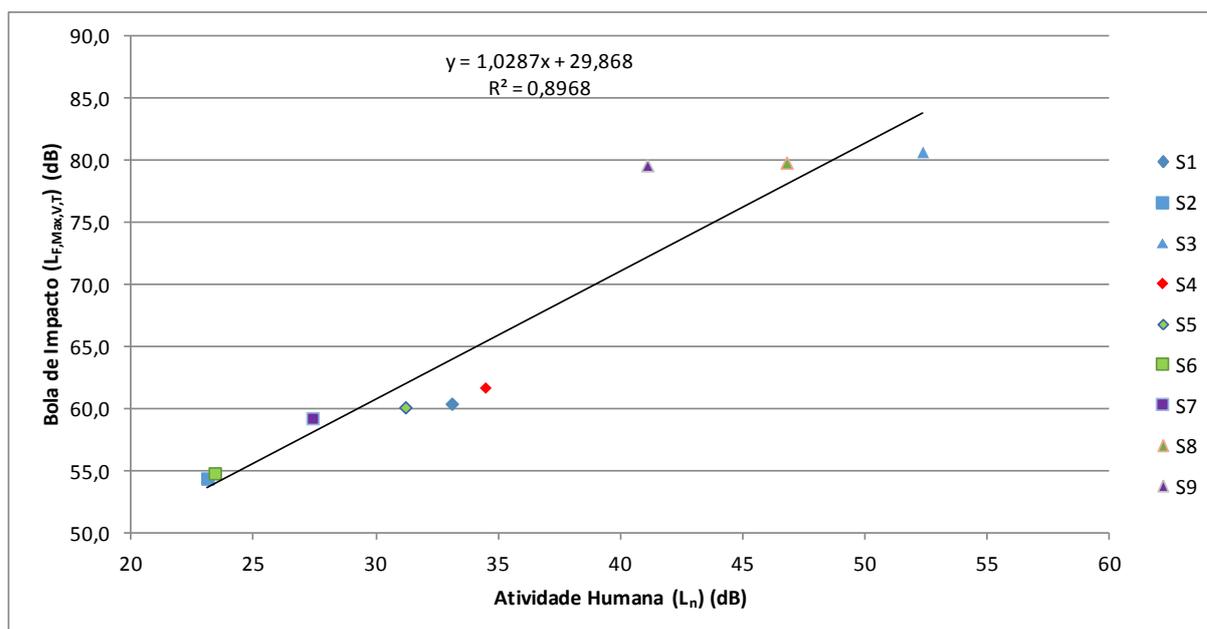


Figura 4.22 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 50 Hz.

Observando as figuras verifica-se que a melhor correlação ocorre com a fonte máquina de percussão modificada com um $R^2 = 0,9426$.

A fonte que melhor se correlaciona com a atividade humana, a seguir à máquina de percussão modificada, para a banda de um terço de oitava de 63 Hz é a bola de impacto com um valor de R^2 de 0,9257 e por fim, a máquina de percussão normalizada com $R^2 = 0,9128$.

Na Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28 são apresentadas as regressões lineares obtidas para a banda de um terço de oitava de 80 Hz. Os valores de R^2 são 0,9141, 0,8442 e 0,7688 para as fontes máquina de percussão normalizada, máquina de percussão modifica e bola de impacto, respetivamente.

Verificou-se que a máquina de percussão normalizada é a fonte que melhor se correlaciona com a atividade humana, para a banda dos 80 Hz. Verificou-se também que, a bola de impacto é a que apresenta uma menor correlação quando comparada com a atividade humana, para a banda dos 80 Hz.

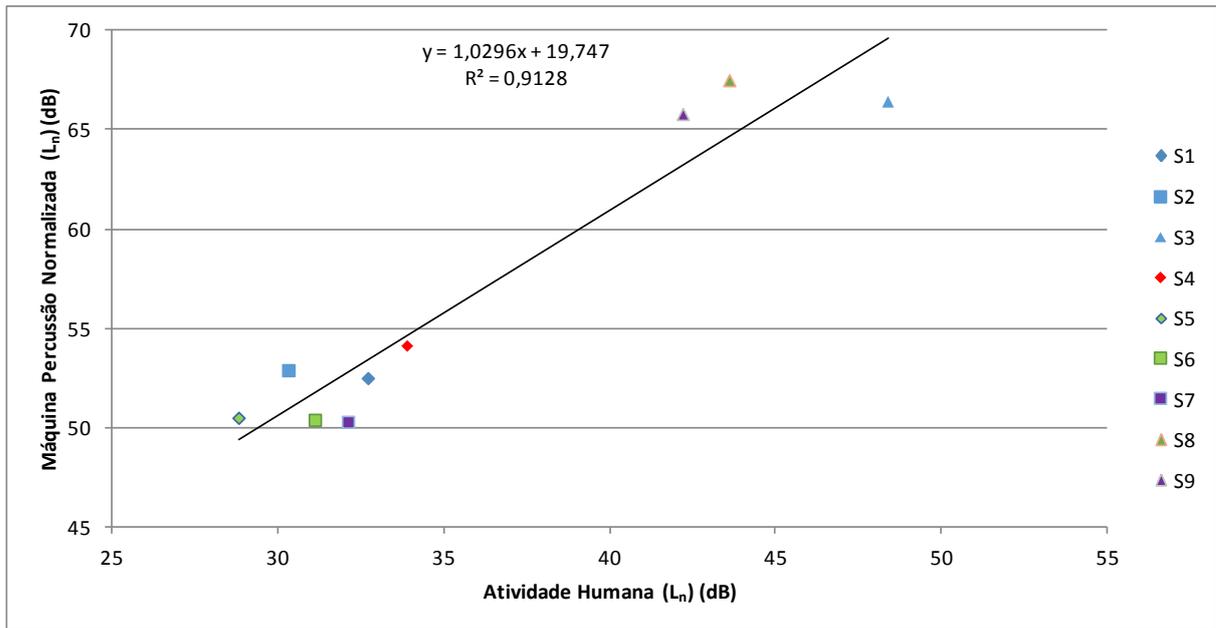


Figura 4.23 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 63 Hz.

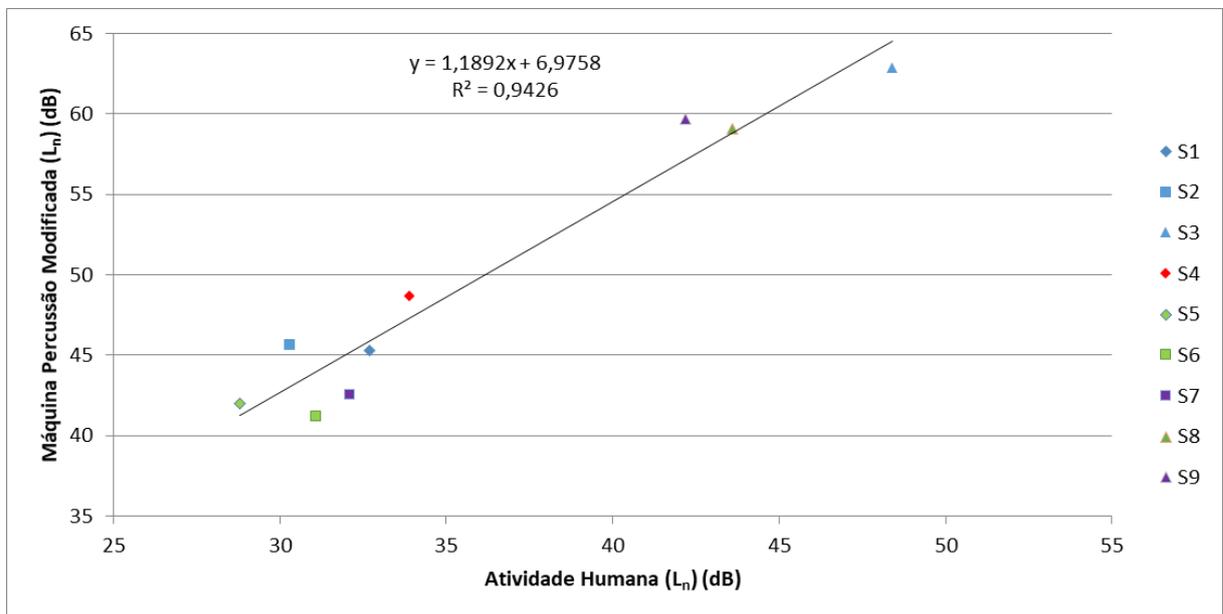


Figura 4.24 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 63 Hz.

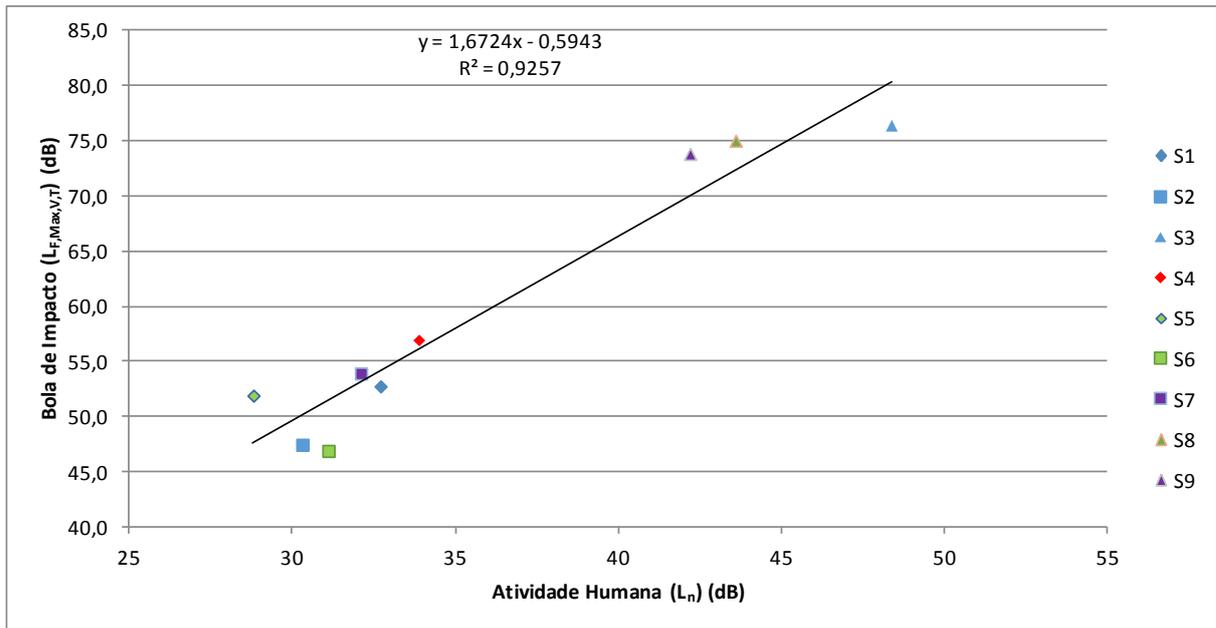


Figura 4.25 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 63 Hz.

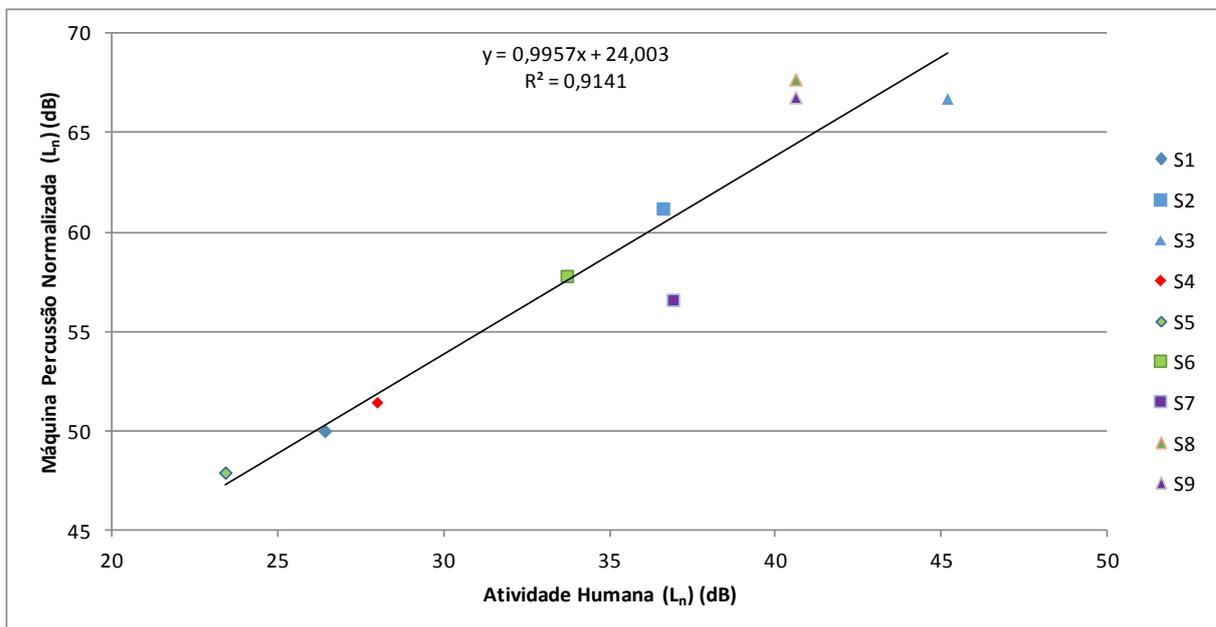


Figura 4.26 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão normalizada para a banda de frequência dos 80 Hz.

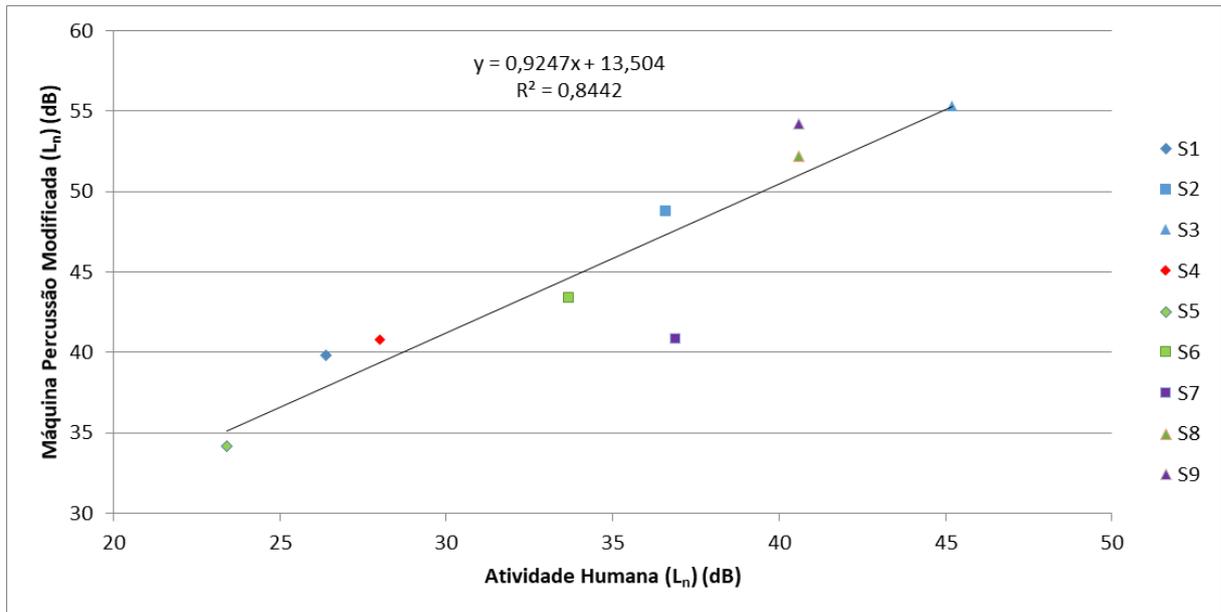


Figura 4.27 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a máquina de percussão modificada para a banda de frequência dos 80 Hz.

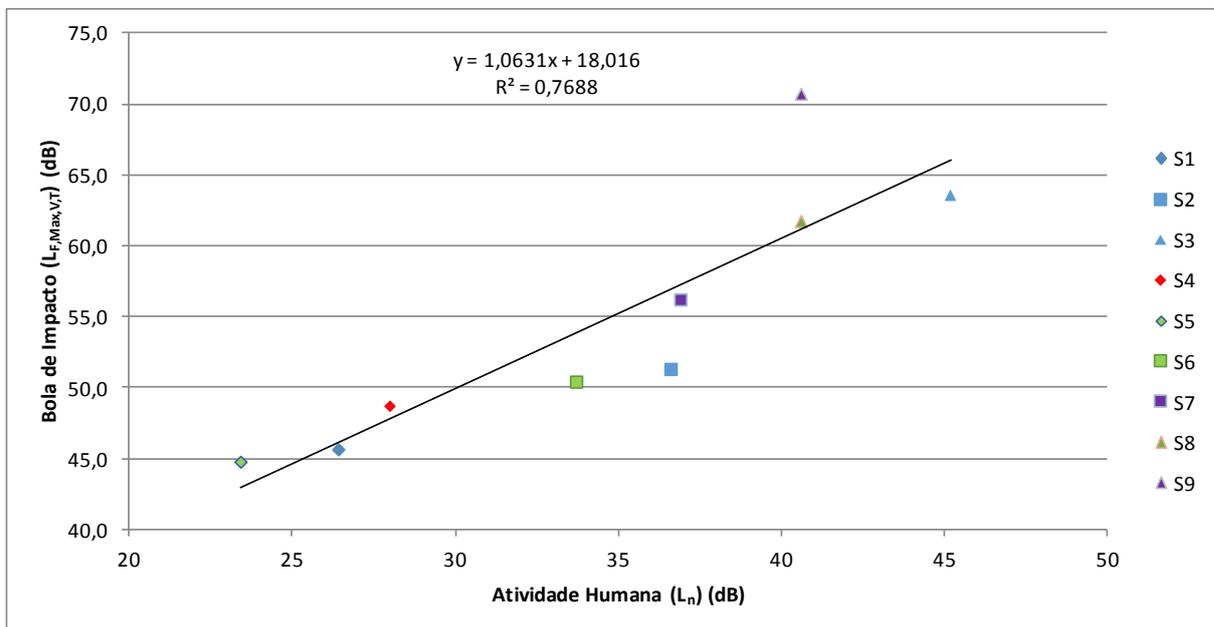


Figura 4.28 - Regressão linear simples dos resultados obtidos com a atividade humana e a bola de impacto para a banda de frequência dos 80 Hz.

5 Conclusões e trabalhos futuros

A utilização de diferentes fontes de percussão para ensaiar as diferentes soluções construtivas, em laboratório, permitiu comparar os níveis sonoros gerados em cada tipo de pavimento.

Verificou-se que a máquina de percussão normalizada é a fonte que gerou níveis sonoros mais elevados em frequências mais altas. Para frequências mais baixas foi a bola de impacto a gerar maiores níveis sonoros, nomeadamente para a banda de um terço de oitava de 50 Hz.

A fonte que gerou níveis sonoros mais baixos ao longo do espectro foi a atividade humana.

A máquina de percussão modificada também dá origem a níveis sonoros mais baixos que outras fontes, nomeadamente nas frequências mais baixas. Refira-se que os resultados obtidos com a máquina de percussão modificada podem estar subestimados devido ao facto de não ter sido ajustada a altura de queda dos martelos.

No entanto verificou-se, pela comparação realizada entre os níveis sonoros gerados pelas diversas fontes que, a fonte máquina de percussão modificada é aquela que gera níveis sonoros mais próximos dos gerados pela atividade humana simulada no presente trabalho.

Para uma solução construtiva específica, laje de vigotas sem revestimento, verificou-se que a fonte bola de impacto e a máquina de percussão modificada geravam níveis sonoros normalizados máximos e níveis sonoros de percussão normalizados muito semelhantes.

Ao ser analisada a correlação da bola de impacto com as restantes fontes, para as bandas de um terço de oitava de 50, 63 e 80 Hz, verificou-se que a máquina de percussão normalizada era a que melhor se correlacionava com a bola de impacto.

A análise da correlação obtida entre a fonte atividade humana e as restantes fontes mostra que, para as bandas de um terço de oitava de 50 e 80 Hz, a bola de impacto é a fonte que melhor se correlaciona com a da atividade humana e que, para a banda de frequência dos 63 Hz é a máquina de percussão modificada a que apresenta melhor correlação.

A análise de frequências isoladas pode não representar a tendência global da fonte, pois quando se analisam as curvas de nível sonoro ao longo da frequência, o espectro que melhor se aproxima do gerado pela atividade humana é o da fonte de percussão modificada.

Verifica-se que o som de percussão gerado pelas várias fontes depende da solução construtiva, mas a semelhança entre níveis sonoros gerados por diferentes fontes também depende da solução construtiva ensaiada.

Em trabalhos futuros propõe-se que se faça um estudo mais aprofundado da fonte gerada pela atividade humana, realizando várias medições para várias pessoas com constituições diferentes e usando diversos tipos de atividades (caminhar, correr saltar), de forma a averiguar a influência que cada uma dessas variações tem nos níveis sonoros gerados.

Sugere-se, também que sejam realizados novos ensaios com a queda dos martelos da máquina ajustada de forma a introduzir a mesma quantidade de energia de a máquina de percussão normalizada.

6 Referências Bibliográficas

- Alimohammadi, I., & Ebrahimi, H. (2017). Comparison between effects of low and high frequency noise on mental performance. *Applied Acoustics*, *126*, 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.021>
- Alves-Pereira, M., & A.Castelo Branco, N. A. (2009). 670-2408-1-PB.pdf. *Revista Lusófona de Ciências E Tecnologias Da Saúde*, *4*(2), 186–200.
- António, J., & Mateus, D. (2015). Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings. *Applied Acoustics*, *89*, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.019>
- Broner, N. (1978). The effects of low frequency noise on people. *Journal of Sound and Vibration*, *58*(1 978), 483–500. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(78\)90354-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(78)90354-1)
- Decreto Lei nº 96/2008 de 9 de Junho de 2008, Diário da República, I Série, nº 110, 9 Junho de 2008.
- ISO 10140-1:2010-Acoustic - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 1: Applicatio rules for specific products, CEN (2010)
- ISO 10140-3:2010-Acoustic - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 3 - Measurement of impact sound insulation, CEN (2010)
- ISO 10140-4:2010-Acoustic - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements, CEN (2010)
- ISO 10140-5:2010-Acoustic - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment, CEN (2010)
- ISO 16283-1-Acoustic - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation, CEN (2014)
- ISO 16283-2-Acoustic - Field measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 2: Impact sound insulation, CEN (2015)
- ISO 16283-3-Acoustic - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Façade sound insulation, CEN (2016)
- ISO 16032 - Acoustic - Measurement of sound pressure level from service equipment in buildings - Engineering method, CEN (2004)
- ISO 9052-1-Acoustics - Determination of dynamic stiffnes - Part 1: Materials used under floating floor in dwellings, CEN (1989)
- Jeon, J. Y., Lee, P. J., & Sato, S. (2009). Use of the standard rubber ball as an impact source with

- heavyweight concrete floors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 167–178. <https://doi.org/10.1121/1.3148193>
- Rasmussen, B. (2010). Sound insulation between dwellings - Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*, 71(4), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011>
- Shi, W., Johansson, C., & Sundbäck, U. (1997). An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement. *Applied Acoustics*, 51(1), 85–108. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(96\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(96)00071-0)
- World Health Organization. (2011). *Burden of disease from environmental Noise*. World Health Organization Regional Office for Europe. Retrieved from http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888.pdf?ua=1
- Yeon, J. O., Kim, K. W., & Yang, K. S. (2017). A correlation between a single number quantity and noise level of real impact sources for floor impact sound. *Applied Acoustics*, 125, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.019>