



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INVESTIGAÇÃO DE CONTRAPISOS COM BORRACHA TRITURADA
COMO MATERIAL AGREGADO PARA ISOLAMENTO DE RUÍDO DE
IMPACTO**

FRANCISCO CLEUTON DA CUNHA LIMA

WIGOR DA PAZ SILVA

TUCURUÍ
2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INVESTIGAÇÃO DE CONTRAPISOS COM BORRACHA TRITURADA
COMO MATERIAL AGREGADO PARA ISOLAMENTO DE RUÍDO DE
IMPACTO**

FRANCISCO CLEUTON DA CUNHA LIMA

WIGOR DA PAZ SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos

TUCURUÍ

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Wigor da Paz
Investigação de Contrapisos com Borracha Triturada como
Material Agregado para Isolamento de Ruído de Impacto / Wigor
da Paz Silva, Francisco Cleuton da Cunha Lima . — 2020.
66 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí,
Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

1. Ruído de Impacto. 2. Sistemas de Pisos. 3. Norma de
Desempenho Acústico. I. Título.

CDD 620.2



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO DE CONTRAPISOS COM BORRACHA TRITURADA
COMO MATERIAL AGREGADO PARA ISOLAMENTO DE RUÍDO DE
IMPACTO

FRANCISCO CLEUTON DA CUNHA LIMA

WIGOR DA PAZ SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Leopoldo Pacheco Bastos

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos
FEM/CAMTUC/UFPA

Walter dos Santos Sousa

Membro Interno: Prof. Me. Walter dos Santos Sousa
FEM/CAMTUC/UFPA

Ayrton José Taveira de Souza

Membro Interno: Prof. Eng. Ayrton José Taveira de Souza
FEM/CAMTUC/UFPA

Conceito **B**

Tucuruí, 18 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS DE FRANCISCO CLEUTON DA CUNHA LIMA

Sempre será em primeiro lugar em tudo em minha vida agradecido e exaltado o nome do senhor meu Deus, a ele agradeço por mais essa conquista.

Aos meus pais Iracema e Francisco, que me formaram como pessoa, e por todo seu amor e carinho.

Agradeço a minha querida esposa Graciene, por estar do meu lado nessa caminhada e por sempre acreditar em mim e me fortalecer nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Glecia, Gregório e Daniel, assim como todos os meus familiares, por contribuírem na minha formação como pessoa.

Ao meu parceiro neste trabalho de conclusão de curso, Wigor, por seu empenho e por nunca desistir de lutar.

Ao meu amigo Cristóvão, que sempre me ajudou e esteve presente nas horas de dificuldade.

Ao Alexsandro Rickelme, bolsista do laboratório de acústica que contribuiu durante os ensaios do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos.

Aos meus colegas de curso, aos meus professores e a Universidade Federal do Pará que tanto foram importantes em minha caminhada acadêmica.

AGRADECIMENTOS DE WIGOR DA PAZ SILVA

Não teria como começa esse agradecimento sem ser agradecendo a Deus, pois sem ele, sem dúvidas não estaria aqui.

Agradeço aos meus pais Wilson e Jovelina, por serem exemplos na minha vida, por sempre acreditarem no meu sonho e por me derem força nos momentos difíceis.

Ao meu irmão Gabriel, meus avós, e todos os meus familiares, por contribuírem na minha formação como pessoa.

Á minha querida Isabela, por estar do meu lado nessa caminhada e por sempre acreditar em mim.

Ao meu parceiro neste trabalho de conclusão de curso, Cleuton, por seu empenho e por sempre acreditar que daria certo.

Ao Alexsandro Rickelme, bolsista do laboratório de acústica que foi de grande ajuda durante os testes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos.

Aos meus colegas com que estudei, aos meus professores e a Universidade Federal do Pará que tanto foram importantes na minha caminhada acadêmica.

Momentos felizes louve a Deus!
Momentos difíceis busque a Deus!
Momentos silenciosos adore a Deus!
Momentos dolorosos confie em Deus!
Cada momento agradeça a Deus!

(Autor Desconhecido)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de compensação.....	17
Figura 2 - Percurso esquemático de uma onda sonora incidindo em uma parede.....	18
Figura 3 - Pressão acústica.....	21
Figura 4 - Pressões sonoras compreendidas entre os limiares da audição e da dor.....	22
Figura 5 - Reflectograma evidenciando as três regiões de uma sala.....	23
Figura 6 - Perda de energia durante a trajetória de um raio.....	23
Figura 7 - Espectro idealizado do índice de redução de ruído.....	27
Figura 8 - Esquema de piso flutuante, e associação teórica com modelo massa mola...	29
Figura 9 - Fluxograma de operações de reciclagem.....	32
Figura 10 - Etapas de construção da minicâmara: (a) formas de madeira para preenchimento com concreto, (b) câmara após a cura do concreto e (c) após a instalação da porta e ferragens.....	35
Figura 11 - Projeto em CAD da adaptação da câmara reverberante para teste de ruído de impacto.....	36
Figura 12 - Câmara pronta para uso pós adaptações.....	36
Figura 13 - Borracha triturada usada nas amostras.....	37
Figura 14 - Contrapisos de 10 %, 20 % e 30 % com borracha e 100m de espessura.....	38
Figura 15 - Contrapisos de 10 %, 20 % e 30 % com borracha e 60m de espessura.....	38
Figura 16 - Amostras posicionadas no piso para realização dos ensaios.....	39
Figura 17 - Tapping machine.....	40
Figura 18 - Tapping machine posicionada sobre uma amostra.....	40
Figura 19 - Medidor de pressão sonora e amplificador de sinal.....	41
Figura 20 - Microfone de campo difuso.....	41
Figura 21 - Esquema da cadeia de medição durante os testes de ruído de impacto.....	42
Figura 22 - Cadeia de medição ruído de impacto.....	42
Figura 23 - Posição inicial da máquina para realização dos ensaios.....	44
Figura 24 - Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada.....	46
Figura 25 - Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada.....	47
Figura 26 - Resultados das amostras para o $L'_{nt,w}$	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos NBR 15575-3 limites normativos de isolamento ao ruído de impacto.	31
Tabela 2 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderada	48
Tabela 3 - Resultados para contra piso com 60 mm de espessura.....	48
Tabela 4 - Resultados para contrapiso com 100 mm de espessura.....	49

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
ISO	International Organization for Standardization
Li	Nível de Ruído de Impacto
L _n	Nível de Pressão Sonora de Impacto Normalizada
L _{n,t}	Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada
L _{nt,w}	Nível de Pressão Sonora de Impacto Padrão Ponderado
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
UFPA	Universidade Federal do Pará
CAMTUC	Campus Universitário de Tucuruí

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	JUSTIFICATIVA	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	SOM E RUÍDO	16
3.2	O DECIBEL E AS CURVAS DE COMPENSAÇÃO	16
3.2.1	O Decibel	16
3.2.2	Curvas de Compensação	17
3.3	PROPAGAÇÃO DO SOM.....	18
3.3.1	Propagação do Som em Meio Fluido	19
3.3.2	Propagação do Som em Meios Sólidos	20
3.4	PRESSÃO SONORA E NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.....	21
3.5	REVERBERAÇÃO.....	22
3.5.1	Tempo de Reverberação	23
3.5.2	Tempo de Reverberação de Sabine	24
3.6	RUIDO DE IMPACTO	24
3.6.1	Sistema de pisos	25
3.6.2	Transmissão do ruído de impacto	25
3.7	ISOLAMENTO SONORO	26
3.7.1	Isolamento de Ruídos Aéreos	26
3.7.2	Isolamento de Ruído de Impacto	27
3.8	EXIGÊNCIA DE CONTROLE DE RUÍDO EM EDIFICAÇÕES	30
3.9	GANHO SOCIOAMBIENTAL NA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA TRITURADA DE PNEU.....	31
4.	METODOLOGIA.....	34
4.1	ADEQUAÇÃO DE UMA CÂMARA REVERBERANTE PARA ENSAIOS E QUANTIFICAÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO	34
4.2	CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS.....	37
4.3	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA	39
4.3	MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	43

4.3.1 Ensaio de isolamento do ruído de impacto	43
4.3.2 Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 ANÁLISE ACÚSTICA	46
6. CONCLUSÃO	50
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE - Medições de Ruído de Impacto das Amostras de Contrapisos testadas ...55	

RESUMO

Segundo a norma ABNT/NBR 15575:2013 que trata da normalização de desempenho em edificações, incluindo o desempenho acústico, gerou-se no mercado de construção civil a necessidade de se adaptar às novas regras. A acústica do ambiente possui relação direta com o conforto e bem-estar dos usuários do local, principalmente quando se trata de habitações verticais. Com intuito de atenuar o principal ruído presente nestas circunstâncias, o de impacto, existe no mercado diversas alternativas que trazem ganhos acústicos excelentes. No entanto, tais alternativas oneram consideravelmente as edificações, devido ao custo do material acústico e a mão de obra especializada, geralmente necessária em sua aplicação. Neste sentido, esse trabalho busca desenvolver uma forma de conseguir ganhos acústicos coerentes segundo a referida norma, de maneira que seja uma alternativa mais barata e de fácil aplicação a ser utilizada em edificações de baixo custo. A posposta desse trabalho se trata da utilização de borracha triturada oriunda do processo de reciclagem de pneus como material agregado ao contra piso, durante o seu processo de fabricação. No processo construtivo, uma determinada porcentagem de areia é substituída por borracha triturada na composição da liga de concreto visando os ganhos acústicos. Para isto, foram analisados, corpos de prova em uma bancada capaz de realizar experimentos de ruído de impacto, seguindo os procedimentos recomendados pela norma NBR 15575, a fim de constatar a relevância do material para tal finalidade. Concluindo, espera-se, que a utilização de um contra piso com material agregado, possa ser uma alternativa economicamente viável na construção civil no sentido de adequar os novos empreendimentos aos valores estipulados em norma.

Palavras-chave: Ruído de Impacto. Sistemas de Pisos. Norma de Desempenho Acústico.

ABSTRACT

According to the ABNT / NBR 15575: 2013 standard which deals with normalizing the performance in buildings, in which one of the criteria deals with acoustic performance, the need to adapt to the new rules has arisen in the civil construction market. The acoustics of the environment are directly related to the comfort and well-being of users of the place, especially when it comes to vertical dwellings. In order to mitigate the main noise present in these circumstances, the impact noise, there are several alternatives on the market that bring excellent acoustic gains. However, such alternatives considerably burden buildings, due to the cost of the acoustic material and the specialized labor, generally necessary in its application. In this sense, this work seeks to develop a way to achieve coherent acoustic gains according to that standard, so that it is a cheaper and easier application to be used in low cost buildings. The purpose of this work is the use of crushed rubber from the tire recycling process as material added to the underfloor, during its manufacturing process. In the construction process, a certain percentage of sand is replaced by crushed rubber in the composition of the concrete alloy, aiming at the acoustic gains. For this, specimens were analyzed on a bench capable of carrying out impact noise experiments, following the procedures recommended by the NBR 15575 standard, in order to verify the relevance of the material for such purpose. In conclusion, it is expected that the use of a counter floor with aggregated material can be an economically viable alternative in civil construction in order to adapt the new developments to the values stipulated in the norm.

Key-words: Impact Noise. Mortar Arrangements. Acoustic Performance Standard.

1 INTRODUÇÃO

Seja no ambiente de trabalho ou no ambiente doméstico, o controle e tratamento do excesso de ruído se faz necessário para se obter um melhor conforto acústico, obtendo-se bem-estar físico e psíquico. Deste modo, a criação de novas técnicas construtivas que buscam melhorias em acústica de edificações tem se tornado objeto de importantes estudos e um aspecto absolutamente relevante nos novos projetos de edificações em todo o país.

Segundo a Proacústica (2013), da segunda metade dos anos 1980 em diante, devido a exigências de segurança estrutural, tempo de obra reduzido e viabilidade econômica, optou-se pela redução da espessura de paredes e pisos, o que interferiu negativamente no desempenho acústico das edificações. A utilização de materiais leves e um número menor de pilares são cada vez mais frequentes, todavia essa tendência acaba por prejudicar o isolamento acústico. Segundo Gerges (2000) um bom isolamento está ligado à massa do material construtivo e a uma boa vedação do ambiente.

Com a criação da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), que determinou requisitos mínimos para eficiência acústica, houve um aumento sobre a temática relacionada ao isolamento sonoro, especialmente quando se trata do ruído de impacto em sistemas de piso de habitações verticais que é foco do presente trabalho. Quando o ruído se torna demasiadamente perturbador, este pode afetar o bem-estar, refletindo diretamente na saúde dos usuários, de um determinado recinto causando estresse e interferindo sua qualidade de vida.

Os ruídos mais perturbadores, em se tratando de edificações habitacionais, são: o ruído aéreo e o ruído de impacto. Segundo a NBR 15575-3 (ABNT, 2013) o ruído aéreo é todo som produzido e transmitido através do ar, enquanto o ruído de impacto é todo som produzido pela percussão sobre um corpo sólido e transmitido através do ar, sendo caracterizado, conforme Bistafa (2011), como sons gerados por pisadas e quedas de objetos sobre lajes, provocando grande desconforto em prédios de apartamentos, por serem ouvidos claramente pelo vizinho de baixo.

Em regiões e cidades de pequeno e médio porte há um déficit na instalação de grandes construtoras, somado à falta de estudos e técnicas construtivas com controle de ruído em edificações de menor tamanho. Desta forma, abre-se um leque de oportunidade para estudos, pesquisa e desenvolvimento de técnicas mais acessíveis no que se refere ao conforto acústico durante a construção de prédios menores.

De acordo com Pedroso (2007), para atender os requisitos normativos da norma NBR 15575-3 (ANBT, 2013), a utilização de piso flutuante tem apresentado vantagens significativas por promover maior conforto acústico do que outras soluções adotadas (emulsão acústica, argamassa de acabamento viscoelástica, etc.), permitindo a utilização de revestimento final segundo a preferência do usuário. Segundo Bistafa (2011), essa solução consiste na aplicação de um material resiliente isolador entre a laje estrutural e o contrapiso criando uma base antivibratória entre eles com finalidade de amortecer a onda sonora. Esse material resiliente, que pode ser lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido elastizado, entre diversos outros, deve ser aplicado de maneira que garanta a não existência de contato entre as duas superfícies (contrapiso e laje).

Assim, como o sistema de pisos flutuantes, outras alternativas de isolamento acústico ao ruído de impacto não são totalmente difundidas entre os construtores, e as formas consolidadas de estruturação de lajes e contrapisos ainda são utilizadas em larga escala, devido ao caráter tradicional e de grande inércia às alterações do mercado. Neste contexto, este trabalho busca uma alternativa para sistemas de pisos, especificamente para o contrapiso da laje, ao utilizar borracha triturada (proveniente da reciclagem de pneus) como material agregado, a fim de obter ganhos em termos de isolamento ao ruído de impacto com baixo custo e através de um processo simplificado.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por comodidade, praticidade e segurança, associadas ao aumento da densidade demográfica nas cidades e ao alto valor dos terrenos, contribuíram para um aumento significativo das construções verticais nas últimas décadas. Quanto mais desenvolvida é a cidade, maior é a quantidade das edificações verticais e, portanto, maior rigor deve ser empenhado ao cumprimento dos requisitos normativos, relacionados à acústica, durante o seu processo construtivo, de maneira a evitar problemas de ruído posteriormente. O desempenho acústico de elementos construtivos de edificações, tais como pisos e lajes, é avaliado quanto ao isolamento ao ruído aéreo e de impacto, foco deste trabalho, conforme a norma NBR 15.575. Para garantir o atendimento à referida norma, as práticas tradicionais empregadas na construção civil (aplicação de mantas emborrachadas e emulsão asfáltica entre a laje e o contrapiso, por exemplo) são onerosas, em custo e tempo, e não apresentam alta produtividade.

Neste contexto, o presente trabalho investiga a influência da adição de borracha triturada, proveniente de pneus reciclados, em contrapisos tradicionais na busca por

melhorias acústicas em sistemas de pisos, contribuindo inclusive para a redução do descarte inadequado de pneus.

Adicionalmente, a reciclagem de materiais é uma atividade que precisa de incentivos para se fixar na sociedade e fazer parte da cadeia produtiva, o que gera ganhos socioeconômico ao promover geração de emprego e renda para pessoas que coletam e empresas/cooperativas que beneficiam os materiais reciclados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Adequação a estrutura existente para investigar sistemas de piso construídos com borracha triturada como material agregado, avaliando sua capacidade de isolar ruídos de impacto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma bancada experimental para testes de ruído de impacto aproveitando a estrutura existente da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da UFPA-CAMTUC.
- Fabricar sistemas de contrapisos de diferentes espessuras (60 mm e 100 mm) com diferentes percentuais de borracha triturada (10%, 20% e 30% do peso total do contrapiso).
- Testar os sistemas de piso construídos quanto à capacidade de isolamento a ruídos de impacto.
- Realizar estudo para identificar os parâmetros mais influentes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis seções, distribuídos da seguinte forma:

Na seção 1, o tema do presente trabalho é introduzido juntamente com a especificação do problema. Na sequência, a motivação para seu desenvolvimento é apresentada bem como os objetivos e estrutura do trabalho.

A seção 2 traz uma revisão da literatura a trabalhos relevantes relacionados ao emprego de materiais alternativos utilizados para potencializar o isolamento ao ruído de impacto de sistemas de piso.

Na seção 3 é apresentada uma fundamentação teórica relacionada à determinação da capacidade de isolamento ao ruído de impacto de sistemas de piso, procedimentos e equações aplicáveis.

Na seção 4, é apresentada a metodologia de desenvolvimento dos sistemas de piso, procedimentos de medição e equipamentos utilizados nos testes.

Na seção 5 são discutidos os resultados obtidos e algumas hipóteses são levantadas como forma de elucidar o desempenho de alguns sistemas de piso.

Na seção 6 são apresentadas as considerações finais da pesquisa e a proposição para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados, de forma resumida, os principais trabalhos publicados nos meios científicos da área de pesquisa e afins relacionados ao tema aqui abordado, auxiliando, assim, na definição de estratégias e metodologias para o cumprimento dos objetivos propostos. Outro intuito, é mostrar o estado da arte acerca do uso de materiais sustentáveis no desenvolvimento de produtos com função acústica, bem como no que diz respeito a sua eficiência, aplicabilidade e normatização.

A utilização de materiais alternativos para fins acústicos iniciou nos anos 2000 com aplicações na indústria automotiva, considerando o uso de partes internas feitas de fibras naturais (NICK et al., 2002) e sugestões de uso na construção civil, considerando o uso de painéis de fibra de coco como material resiliente entre laje e contrapiso (RODRIGUES; CARVALHO, 2003).

Posteriormente, Lima Júnior (2007) investigou a utilização de fibras obtidas do caroço do açaí em compósitos cimentícios para fins diversos, como telhas, placas (ou painéis de vedação), pisos intertravados, concretos e concretos pré-moldados de cimento Portland. O desempenho do material final (sistemas de piso com adição de fibra de açaí) como fibrocimento apresentou ganhos em relação à resistência à tração (13% superior) e custo reduzido devido à adição da fibra de açaí, em relação a um piso convencional.

Grison *et al* (2010), discorrem sobre importantes características da borracha que a tornam um material propício para utilização em diversas aplicações da construção civil. Dentre elas, a boa resiliência, baixa condução a produtos perigosos, não toxicidade, baixa suscetibilidade a fungos e baixa condutividade térmica.

Asdrubali *et al* (2012) faz uma revisão sobre o estado da arte quanto ao uso de materiais sustentáveis como meio alternativo para tratamentos acústicos, e evidenciam que materiais acústicos sustentáveis são uma realidade no mercado atual, tendo bastante competitividade pela sua eficiência aproximada a de materiais totalmente industrializados, aliada ao seu baixo custo e apelo ecológico, pelo não emprego ou uso de pouco combustível fóssil em seu processo produtivo. Adicionalmente, os autores destacam que, para casos de atenuação de ruído de impacto, materiais como cortiça e borrachas recicladas podem oferecer bons resultados, tendo como característica adicional o fato de serem bons isolantes térmicos e não prejudiciais à saúde humana. Por fim, os autores mencionam que as propriedades físicas de muitos materiais sustentáveis não estão completamente caracterizadas, e os produtos não são em sua totalidade, até o momento,

certificados em termos de normas acústicas e performance relacionadas a alcançar o nível técnico e comercial de maturidade necessário.

Borges (2015) analisou as propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados a fim de comprovar a importância de materiais reciclados na construção civil, gerando soluções para conservação do meio ambiente. Teve como objetivo identificar o potencial acústico de compósitos de argamassas com substituição do percentual da areia por resíduos. Os resíduos inseridos nos contrapisos foram de 3 diferentes setores industriais: da agroindústria usou a casca de arroz; da indústria calçadista o EVA (Acetato-Vinilo de Etileno); e do setor madeireiro a serragem, com percentuais de 25%,50%,75% de substituição da areia na composição da mistura da argamassa. Em placas de 1m² e com espessuras de 3 e 5cm foram realizadas as medições de isolamento de ruído de impacto, onde segundo Borges (2015) os resultados mostraram a redução do ruído de impacto foi maior conforme o aumento do percentual de resíduo assim como a espessura da placa. Destaca que em seus estudos, em relação ao nível de pressão sonora padronizado ponderado ($L'_{nt,w}$), o EVA obteve um melhor resultado entre os três tipos de resíduo. As amostras confeccionadas com 50% de casca de arroz apresentaram reduções de 1 dB para as espessuras de 3 cm e de 3 dB nas amostras com espessuras de 5 cm em relação às amostras de referência.

Santos (2015), estudou a capacidade de isolamento ao ruído de impacto de amostras de mantas à base de materiais regionais, materiais industrializados e borracha líquida impermeabilizante. As mantas deste estudo, foram produzidas a partir da técnica conhecida como encauchado¹. Utilizando como aparato experimental uma câmara reverberante em escala reduzida – simulando a sala receptora de ruído, uma amostra de laje – simulando o elemento estrutural transmissor do ruído, uma *tapping machine* como fonte de ruído e microfones, no interior da sala receptora, para captarem os níveis de pressão sonora. O autor classificou as mantas de seu estudo, a partir do índice único de redução de ruído, ($L'_{nT,w}$), determinado através da metodologia recomendada pela norma NBR 15.575 (ABNT, 2013). Como resultado, as mantas foram ditas de desempenho mínimo, segundo a classificação da referida norma. Vale ressaltar, porém, que em seus testes o autor não considera a presença de um elemento estrutural sobre a manta, na forma de um contrapiso ou qualquer tipo de camada de acabamento. Aplicando o impacto diretamente sobre as mantas.

¹ Artefatos de borracha fabricados artesanalmente com látex.

Costa *et al.* (2017) mostra em seu trabalho que entre as diversas atividades de potencial geração de resíduos, destaca-se a construção civil, que contribui significativamente para o desequilíbrio do meio ambiente. Em busca de uma possível mitigação destes efeitos, há uma necessidade de implementação de novos sistemas e tecnologias construtivas menos prejudiciais, sendo um recurso eficiente e sustentável, a substituição de agregados naturais por resíduos industriais em compósitos cimentícios. Seu estudo teve como objetivo uma análise comparativa do isolamento do ruído de impacto de um contrapiso convencional e contrapiso produzido com substituição de 50% do agregado miúdo por resíduo da agroindústria (casca de arroz), aplicando sobre elas três tipos de revestimentos mais usuais nas edificações atualmente: porcelanato, vinílico e laminado. Os ensaios foram realizados com amostras reduzidas de contrapisos com 1,00 m² de área superficial e espessura de 5 cm, em ambiente laboratorial, seguindo as recomendações da ISO 10140-3:2010. O estudo obteve como resultado que a substituição do agregado arenoso por resíduo de casca de arroz não apresentou significativas variações na atenuação da transmissão sonora em relação ao contrapiso de argamassa convencional. Entretanto, o uso de resíduos em substituição aos recursos naturais, já contribui de forma importante no controle de desperdícios de materiais e no avanço da sustentabilidade no setor da construção civil.

Mais recentemente, Lima (2018) desenvolveu mantas à base de látex e fibras naturais (açai e bambu) em diferentes composições, com 6 mm de espessura aproximadamente, e as avaliou enquanto material resiliente, inserido entre laje e contrapiso, quanto às suas capacidades de isolamento ao ruído de impacto. Os testes foram realizados em minicâmaras reverberantes geminadas de madeira, simulando resultados foram obtidos indicaram que algumas mantas tiveram seu desempenho melhorado com a adição das fibras. Ao final, o autor sugere que novos ensaios sejam realizados em uma bancada experimental construída em concreto e em maior escala.

Estes trabalhos indicam os benefícios da utilização de fibras naturais e sintéticas quando empregadas como material agregado em diferentes sistemas construtivos em diversos ramos, bem como revelam o grande potencial ainda não explorado da utilização de fibras em novas aplicações tecnológicas.

Vale mencionar que, para a determinação adequada das propriedades acústicas destas novas aplicações envolvendo fibras naturais e sintéticas, principalmente no que se refere a ruído de impacto, é fundamental dispor de uma bancada experimental adequada e validada para a obtenção de dados acurados. Deste modo, o presente trabalho considera

desenvolver uma bancada experimental para testes de ruído de impacto utilizando-se da infraestrutura existente no Laboratório de Acústica da UFPA-CAMTUC. Uma vez desenvolvida, esta bancada será utilizada para determinar a capacidade de isolamento ao ruído de impacto de contrapisos de diferentes modelos e materiais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SOM E RUÍDO

O som pode ser entendido como uma forma de energia que se propaga através de ondas mecânicas por um meio material que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Esses meios de propagação do som são definidos como meios elásticos, justamente pela capacidade de se deformarem durante a passagem das ondas sonoras, retornando a sua forma original após a passagem das mesmas. As ondas sonoras se propagam através desses meios por sucessivas compressões e rarefações das partículas que os constituem, ou seja, por flutuações de pressão, sendo necessário que a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estejam dentro de determinadas faixas de valores para acontecer uma sensação sonora. O aparelho auditivo humano é sensível aos sons cujas frequências estejam compreendidas na região de 20 a 20.000 Hz, definida como Faixa de Audição. No entanto, ele não é igualmente sensível ao longo desta faixa de frequência. A menor pressão sonora detectada é 20 μPa , isso na frequência de 1 kHz. Esse valor é definido como limiar da audição e foi normalizado como valor de referência para medições de níveis sonoros (GERGES, 2000). O limiar da dor representa as condições de intensidades de energia sonora que podem proporcionar danos à audição, podendo até mesmo ocorrer a perda da audição quando este é ultrapassado, a uma pressão de aproximadamente 60 Pa (BISTAFA, 2006).

Essas flutuações de pressão ocorrem em uma frequência tendo em seu sinal uma determinada amplitude. No entanto, diversas fontes sonoras tem a capacidade de gerar sons em mais de uma frequência, e com diferentes amplitudes. Quando existem no som, diversas amplitudes e frequências, acontecendo ao mesmo tempo, e de forma não harmônica, tem-se um som caracterizado como ruído. O conceito de ruído, portanto, está intimamente ligado ao de som, pois, o ruído vem a ser um som indesejado. Dessa forma, ruído, para fins práticos, é um parâmetro subjetivo, uma vez que sua percepção irá depender de o receptor sentir incômodo.

3.2 O DECIBEL E AS CURVAS DE COMPENSAÇÃO

3.2.1 O Decibel

A grande variação nos níveis de potência, intensidade e pressão sonora existentes e o fato dos sentidos humanos comportarem-se de uma maneira aproximadamente

logarítmica (a percepção de variação da intensidade de um estímulo é baseada no estímulo já existente), fez com que fosse definida uma unidade logarítmica para formar uma escala de níveis de sinal, aplicada a níveis de energia sonora. Esta unidade recebeu o nome de bel (B), em homenagem a Alexander Graham Bell (1847-1922). O bel é representado da forma como mostrado na Equação 1.

$$bel = \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1)$$

Sendo, p , o valor de potência sonora (rms) e p_0 , a potência de referência.

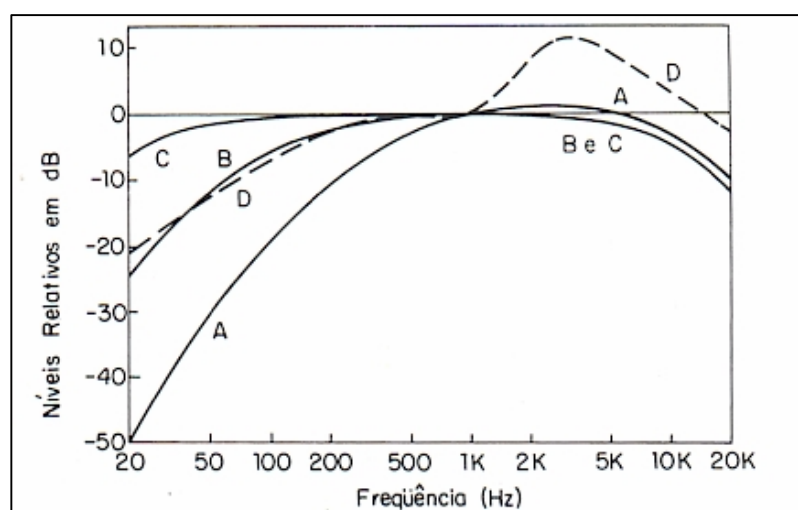
Como cada variação de 1 B equivale a uma multiplicação por 10 do valor da energia envolvida, tem-se então a necessidade de um submúltiplo para indicar variações menores. Por conseguinte, criou-se o decibel (dB), onde se tem a variação de 10 dB para cada variação de 1 B no nível de energia, como mostrado na Equação 2.

$$1 \text{ dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2)$$

3.2.2 Curvas de Compensação

Curvas de compensação são utilizadas em circuitos eletrônicos, localizados no interior de equipamentos para medir níveis sonoros. Esses circuitos proporcionam uma correção dos níveis de energia medidos de modo similar ao comportamento do ouvido humano, compensando, desta forma, as deficiências de sensibilidade conforme as frequências dos sons. Suas utilizações foram padronizadas como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Curvas de compensação.



Fonte: Gerges, 2000.

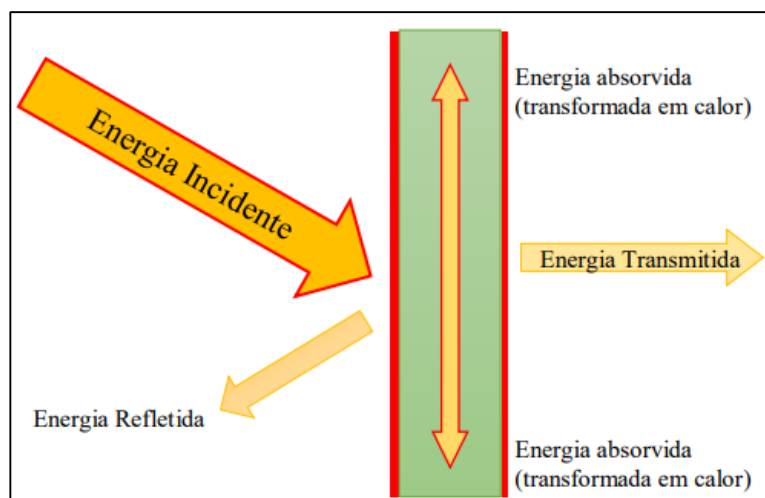
A curva de compensação A é usada para níveis de baixa intensidade, possuindo como unidade de medida o dB (A). A curva de compensação B é usada para níveis de volume intermediário, e possui unidade de medida dB (B). A curva de compensação C é usada para níveis de volume muito intensos, e unidade de medida dB (C). A curva de compensação D é usada para calcular o aumento na perturbação produzida por sons agudos, como aqueles gerados por aeronaves, e possui unidade de medida dB (D).

3.3 PROPAGAÇÃO DO SOM

Como exposto, a propagação do som requisita de um meio de propagação, podendo este ser fluido ou sólido. Quando se estuda a propagação do som em edificações, foco deste trabalho, nota-se que ela se dá pelos dois meios, pelo ar – meio fluido, e pela estrutura da edificação – meio sólido.

Estes meios, por consequência das flutuações de pressões necessárias à propagação do som, terminam por absorver parte dessa energia de forma dissipativa. A este processo deu-se o nome de absorção sonora. A absorção sonora pode ser compreendida, então, como a propriedade dos materiais em não permitir que o som seja refletido por uma superfície. O som, ao incidir sobre uma superfície, tem parte de sua energia sonora refletida e outra parte absorvida. A energia absorvida, por sua vez, pode ser desmembrada em uma parcela dissipada na própria superfície (convertida em calor no interior do material que o compõe) e outra parcela transmitida, tal como esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Percurso esquemático de uma onda sonora incidindo em uma parede.



Fonte: Vinadé (2015).

A medida da capacidade de uma superfície absorver o som é dada pelo *coeficiente de absorção sonora*, α , o qual é definido como a relação entre a energia absorvida pelo material e a energia incidente sobre ele, como mostrado na Equação 3. Os valores de α variam com a frequência, tendo relação direta com as propriedades físicas do material.

$$\alpha = \frac{\text{Energia absorvida}}{\text{Energia incidente}} \quad (3)$$

Quando uma fonte sonora emite uma onda que incide diretamente em um obstáculo, sua energia tem parte refletida, parte absorvida e parte transmitida. A parte transmitida, quando oriunda de um som ruidoso e que se propaga pelo ar, como a voz humana em uma sala de reuniões ou músicas em uma festa, é conhecida como ruído aéreo. Porém, esta não é a única forma em que ocorre a transmissão do ruído, a parte da energia transmitida através de um obstáculo pode ser fruto de um impulso, algo como o cair de objetos, caminhar com calçados de salto ou arrastar de móveis, sendo chamada de ruído impulsivo ou ruído de impacto.

3.3.1 Propagação do Som em Meio Fluido

Fluidos são, na forma técnica, elementos incapazes de resistir a uma tensão de cisalhamento, isto porque quando submetidos a estes tipos de tensão, os fluidos tendem a se movimentar, ou seja, escoam. Diferentemente dos sólidos, que podem resistir a tensões de cisalhamento a partir de deflexões estáticas. Pelas características mencionadas, o ar pode ser classificado como um fluido, e presente na maior parte das situações do dia a dia, se tornou um dos principais meios de propagação de som estudados em problemas de acústica, principalmente no que tange assuntos relacionados à acústica de salas e controle de ruído.

A expressão que descreve a propagação sonora num meio fluido homogêneo, isotrópico e não dissipativo pode ser obtida aplicando o princípio da continuidade, a segunda lei de Newton e a lei das transformações adiabáticas a um volume elementar do meio fluido (PATRÍCIO, 2010), como mostrado na Equação.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

Sendo, ∇ o operador Laplaciano tridimensional, p a pressão sonora em (Pa) e c é a velocidade de propagação da onda, em (m/s).

Para equação diferencial de segunda ordem mostrada acima, foram propostas duas soluções pelo físico e matemático Jean le Rond d'Alembert, uma levando em consideração que a frente de onda, ou conjunto de pontos no espaço que são alcançados pela mesma fase de uma onda simultaneamente, define um plano. Na qual a pressão sonora, escrita em função do tempo, é determinada como mostrado na Equação 5.

$$p_{(x,t)} = \rho_0 c \left[f \left(t - \frac{x}{c} \right) + g \left(t + \frac{x}{c} \right) \right] \quad (5)$$

Esta solução deu origem a teoria acústicas das ondas planas, muito utilizada atualmente para solução de problemas da acústica dita linear. Em sua outra proposta de solução, considera-se que a frente de onda é definida por uma superfície esférica, representada sob a forma da Equação 6. Dando origem assim, a teoria das ondas esféricas.

$$p_{(x,t)} = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{r} f(r - ct) + \frac{1}{r} g(r + ct) \right] \quad (6)$$

Em ambas as equações, o primeiro fator da soma corresponde à velocidade das partículas na onda que se afasta da fonte sonora e o segundo corresponde à onda que se propaga em sentido inverso (em direção à fonte sonora). No caso das ondas planas não existe variação de intensidade sonora com o aumento da distância à fonte – nos meios não dissipativos, naturalmente (PINTO, 2011). Nas ondas esféricas a intensidade sonora decresce de 6 dB por cada duplicação da distância (PATRÍCIO, 2010). Valendo ressaltar, que para grandes distâncias, tem-se que as ondas esféricas se comportam de maneira similar às ondas planas.

3.3.2 Propagação do Som em Meios Sólidos

Em meio sólido, o ruído pode propagar-se através de ondas de vários tipos, sendo que as ondas que mais contribuem para a transmissão da energia sonora são as ondas de flexão, que correspondem, na realidade, à fusão das ondas longitudinais com as ondas transversais (PINTO, 2011). No caso da proposta de estudo deste trabalho, é almejado avaliar intervenções para auxiliar na redução do ruído de impacto em edificações, com característica principal possuir mais de um pavimento, seja ela residencial ou comercial. É importante salientar, que o ruído de impacto pode ser transmitido de um pavimento ao outro por toda a estrutura, parede ou piso, como quando um operário realiza uma atividade de furar ou quebrar parte de uma parede. No entanto, este trabalho enfatiza medidas sobre os pisos, pois são, em questão de frequência, os maiores agentes transmissores desses

ruídos. Justamente por estarem presentes nas atividades que envolvem fontes impulsivas mais comuns, como caminhar, mover móveis ou cair de objetos. Para este caso específico, dos pisos em construções com vários pavimentos, ou seja, lajes, tem-se que a velocidade das ondas longitudinais pode ser expressada na forma da Equação 7.

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\vartheta^2)'}} \quad (7)$$

Sendo, E o módulo de elasticidade, ρ a densidade em kg/m^3 e ϑ o coeficiente de Poisson.

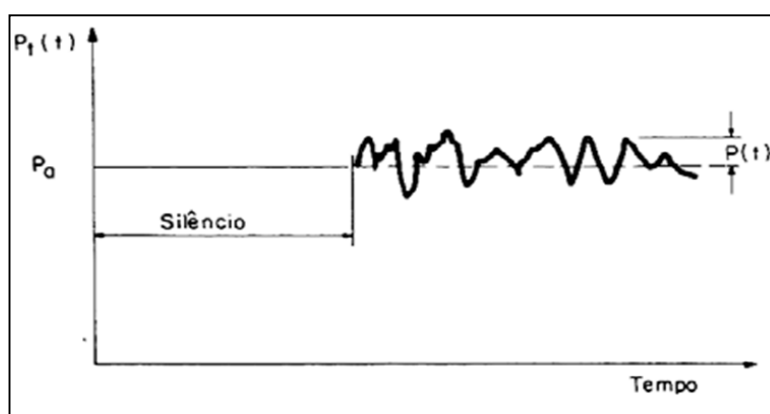
3.4 PRESSÃO SONORA E NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Conforme já mencionado, frequência e amplitude do som são levadas em consideração na determinação da audibilidade humana (*loudness*). A amplitude de pressão sonora $P_{(t)}$ se refere à magnitude da flutuação de pressão total $P'_{(t)}$ em comparação com a pressão atmosférica estática P_a (≈ 1000 milibar em condições normais de temperatura e pressão ambiental), na forma da Equação 8.

$$P_{(t)} = P'_{(t)} - P_a \quad (8)$$

Na Figura 3 é representado o fenômeno acima descrito, mostrando a flutuação da pressão sonora.

Figura 3 - Pressão acústica.

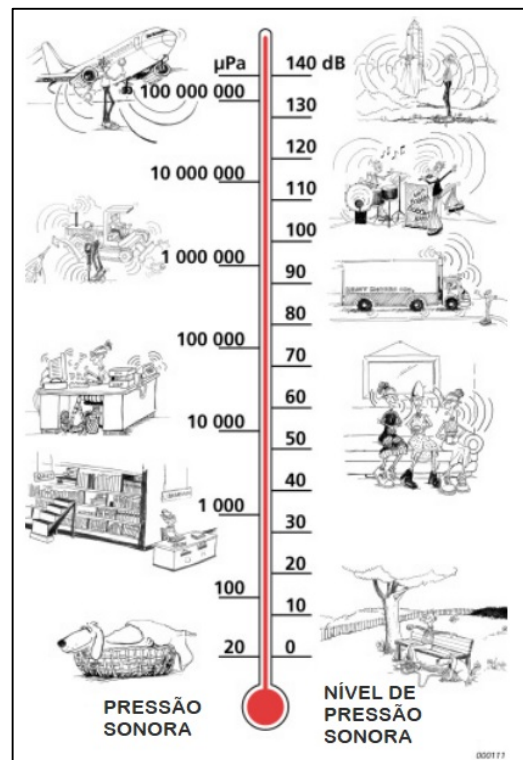


Fonte: Gerges (2000).

Para efeitos de estudo, é muito importante que se faça a quantificação da intensidade dessas pressões. No entanto, os valores em escalas lineares, para os casos mais usuais, possuem flutuações muito elevadas, o que dificulta, em parte, manipulá-los.

Então, a fim de facilitar sua manipulação faz-se uso da escala logarítmica descrita anteriormente, decibel. Para associar os valores dos limiares de audição e de dor, característicos do ouvido humano, a Figura 4 mostra exemplos práticos, ligados ao dia a dia, de sensações de sons e/ou ruídos e seus respectivos valores de pressão, nas escalas linear e logarítmica.

Figura 4 - Pressões sonoras compreendidas entre os limiares da audição e da dor.



Fonte: Brüel & Kjaer, 2000.

O nível de pressão sonora (NPS) é a medida física preferencial para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons, sendo calculado através do valor eficaz da pressão sonora, P_{rms} , em comparação ao valor de pressão sonora de referência, P_0 . (Bistafa, 2006). E pode ser determinada como mostrado na Equação 9

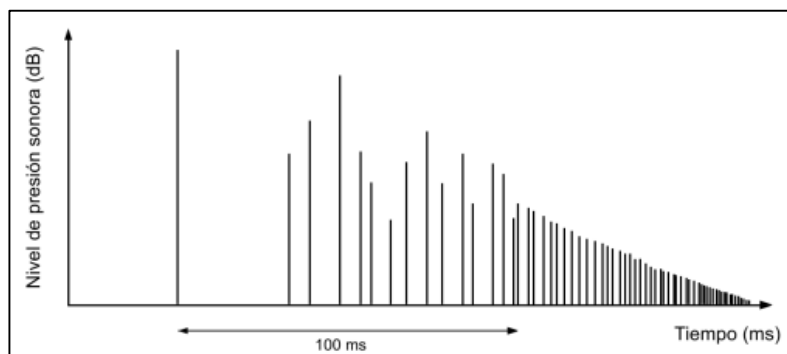
$$NPS = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{rms}^2}{P_0^2} \right) \quad (9)$$

3.5 REVERBERAÇÃO

A reverberação é o fenômeno que está associado a um número exacerbado de reflexões de tal forma a se tornar indistinguível uma da outra, como mostrado na Figura 5. Quando ocorre o fenômeno da reverberação não se percebe, no entanto, um novo som,

tem-se sensação de continuidade do som, justificado pela quantidade de reflexões necessárias à existência do fenômeno.

Figura 5 - Reflectograma evidenciando as três regiões de uma sala.

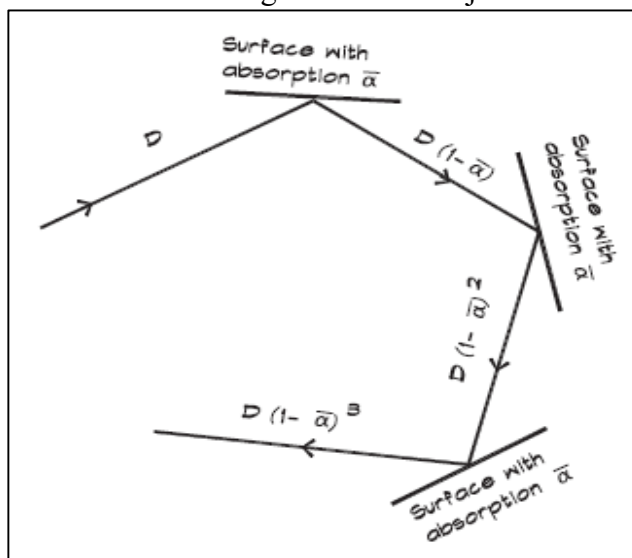


Fonte: Isbert (1998).

3.5.1 Tempo de Reverberação

O termo tempo de reverberação faz menção ao registro do tempo no qual o decaimento de Pressão Sonora é de 60 dB após o desligamento da fonte, ou seja, a partir do momento em que a sala possui energia o suficiente para iniciar o estudo até o momento em que esta energia se torna praticamente desprezível. Esta redução de energia se dá, dentre outros fatores, pelas reflexões, por influência do meio de propagação, isto levando em consideração o coeficiente de absorção de cada material onde o raio reflete, ou do meio pelo qual se desloca como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Perda de energia durante a trajetória de um raio.



Fonte: LONG, 2006.

A partir disto, por meio da equação 10, pode-se determinar o decaimento da pressão sonora, convertendo-a em um nível de pressão sonora em função do tempo chegada.

$$L_p(t) = L_p(t = 0) - 4,34 * \frac{c_o * S_T}{4 * V} * [- \ln(1 - \bar{\alpha})] * t \quad (10)$$

Sendo: c_o a velocidade do som; S_T a área superficial total da sala; $\bar{\alpha}$ o coeficiente de absorção médio (média ponderada entre a somatória das superfícies com seus respectivos coeficientes de absorção e a área superficial total).

3.5.2 Tempo de Reverberação de Sabine

A ideia de existir um tempo característico para o som se extinguir em uma sala foi originada com Wallace Clement Sabine (LONG, 2006), um físico norte americano graduado pela Universidade de Ohio e pós-graduado pela Universidade de Harvard, onde permaneceu como membro, sendo uma de suas principais contribuições para a sociedade o *Symphony Hall* em Boston, no qual participou como arquiteto acústico.

Enquanto cientista sua contribuição se destaca ainda nos dias atuais fora a formulação empírica para a estimativa do tempo de reverberação, mostrada na Equação 11, ao notar em um estudo para solucionar problemas com inteligibilidade da fala em salas de Harvard que o som perdurava por 5 segundos, e uma pessoa falante do idioma inglês é capaz de falar 15 sílabas aproximadamente neste tempo, assim quase nenhuma palavra era entendida nestas condições. Ao adicionar materiais como cadeiras estofadas percebeu uma redução neste tempo, proporcional ao aumento da área de materiais absorvedores inseridos na sala, chegando a sua relação para o tempo de reverberação no sistema métrico.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (11)$$

Sendo, T_{60} é o tempo necessário para decair 60 dB, V é o volume da sala, A é a área total de absorção na sala.

3.6 RUIDO DE IMPACTO

O ruído de impacto tem início quando uma vibração é gerada por uma aplicação de forças no meio sólido, como por exemplo em estruturas de pisos habitacionais.

3.6.1 Sistema de pisos

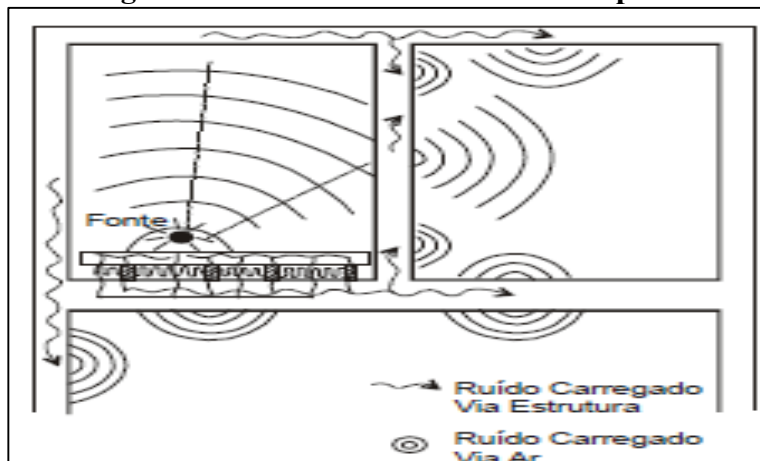
Os sistemas de pisos estão compostos pela camada estrutural (laje) e pelo contrapiso que faz parte da tratativa do presente trabalho. A laje é a camada estrutural e possui duas configurações, pré-moldada ou concreto armado. Já o contrapiso pode ser a configuração padrão sem o tratamento acústico onde leva argamassa de cimento e areia, já o contrapiso flutuante, que é bastante usado no tratamento acústico ao ruído de impacto interpolando de material resiliente entre a laje e o contrapiso melhorando o desempenho acústico. O desempenho de isolamento de impacto ($L'_{nt,w}$) dependem das suas propriedades (densidade, espessura, dimensões e características estruturais de contorno).

3.6.2 Transmissão do ruído de impacto

Segundo Cornacchia (2009) o ruído de impacto se dá por meio de uma excitação por contato, na qual a estrutura se torna um eficiente sistema irradiador de energia em ampla faixa de frequência, em virtude de um movimento vibratório induzido pela excitação localizada como a da queda de objetos, do caminhar de uma pessoa, da utilização de uma ferramenta de impacto, etc. Essa excitação por contato (impacto) determina um movimento ondulatório e pode ser responsável por um grande desconforto acústico, pois excita a estrutura em todas as frequências, inclusive a crítica, ainda que os níveis de pressão sonora originados não sejam elevados (PEDROSO, 2007).

As vibrações de sólidos e impactos, para Souza (2006), são transmitidas sobre uma estrutura provocando posteriormente a vibração do ar (Figura 7), como por exemplo, a queda de um objeto sobre a laje de um edifício fará com que a superfície desta vibre seguida da transmissão do som para os ambientes adjacentes e de uma vibração do ar, sendo captado pelo ouvido humano. A velocidade dessa transmissão é influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas das superfícies impactadas (CARVALHO, 2009).

Figura 7 - Transmissão de ruído de impacto



Fonte: Gerges (1992).

3.7 ISOLAMENTO SONORO

Em toda a grande área de estudo que é a acústica, existe uma parte que se dedica a estudar meios para controlar os níveis de ruídos, de acordo com os ambientes nos quais são encontrados. Os mais diversos estudos mostram, que acerca de controlar os níveis de ruídos, existem basicamente três tipos de medidas a serem tomadas. As que propõe alterações na fonte do ruído, as que sugerem intervenções na trajetória de propagação do ruído entre a fonte e o receptor e, por último, as que propõe intervenções no receptor deste ruído. Esta última sugere, por exemplo, que o receptor, dependendo da intensidade do ruído ao qual se está exposto, use protetores auriculares de plugue, concha, ou ambos simultaneamente. Justamente por ser uma medida de controle de ruído que depende da disciplina do receptor em fazer uso do EPI necessário ao cenário em que se encontra, não é a primeira em que se pensa quando o assunto é conforto acústico. No entanto, as outras duas formas são muito utilizadas, por oferecerem medidas definitivas – desde a fonte de ruído não se altere, e que não dependem do ocupante do ambiente.

3.7.1 Isolamento de Ruídos Aéreos

Os ruídos aéreos podem ser transmitidos basicamente de duas formas, incidência direta e transmissão marginal. Na transmissão direta, o ruído chega ao receptor sem que nada o impeça, ou no caso de estruturas como de edificações, a partir de juntas, fendas ou descontinuidades no elemento construído. Podendo também, ser transmitido a partir da vibração do elemento de construção que separa a fonte do receptor. No caso da transmissão marginal, tem-se que o ruído contorna o elemento de construção entre a fonte

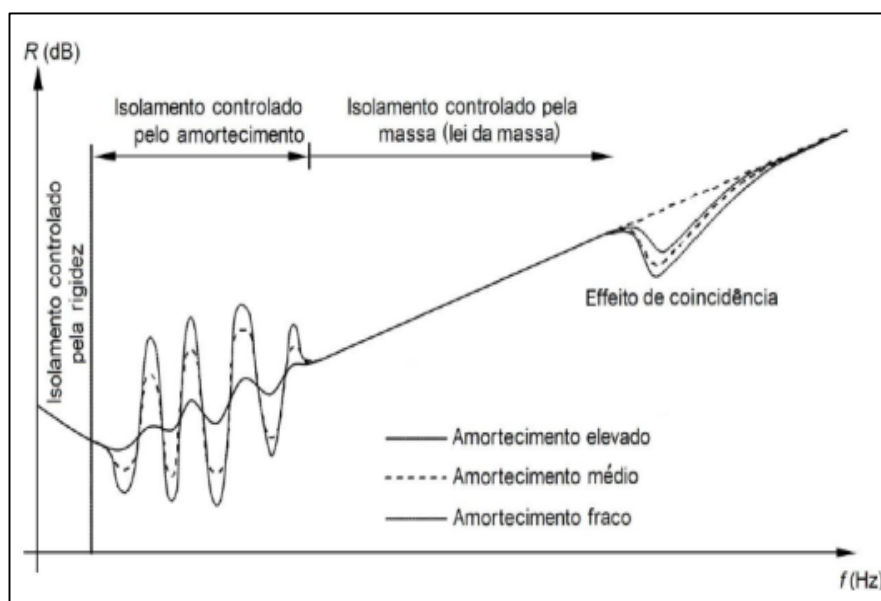
e o receptor, a partir de elementos ligados a ele, como por exemplo as paredes, quando o elemento de construção que separa fonte e receptor for o piso. Para estes casos, o elemento de construção funciona como um sistema oscilante, e a redução de ruído para elementos homogêneos e planos, dependem da sua massa, inércia, frequência da onda e ângulo de incidência, sendo traduzida matematicamente pela Equação 12, que é conhecida como “Lei das Massas”.

$$R_f = k + 20 \log(m \cdot f) \cdot \cos(\theta) \quad (12)$$

Sendo, R_f o índice de redução de ruído; m a massa do elemento; f a frequência da onda e θ o ângulo de incidência da onda.

Analisando a Equação 12, a partir de um estudo de caso controlado, pode-se obter o comportamento da redução de ruído em função da frequência, que se dá na forma que expõe a Figura 7.

Figura 7 - Espectro idealizado do índice de redução de ruído



Fonte: Pinto (2011).

3.7.2 Isolamento de Ruído de Impacto

Quando um som impulsivo, como uma batida de palma, por exemplo, é produzido no interior de uma sala, é possível observar que o som não se extingue instantaneamente, mas sim persiste por algum tempo até decair a um nível imperceptível. Isto fica muito claro, quando a sala em questão, possui característica reverberante, com absorção sonora mínima, de tal forma que as ondas permaneçam no ar por um longo tempo. Com a

característica de baixa absorção, se tem a alta reflexão, o que remete a pequenas transmissões a cada uma das inúmeras reflexões sofridas pela onda nesta sala. Assim, se a sala em questão for um andar de um edifício, pode-se ter a transmissão de ruído para vizinhança. Adicionalmente, o ruído de impacto, pode ser causado também, por um choque direto com a estrutura da edificação ou pavimento, por exemplo, que se propaga pela estrutura através da malha para compartimentos adjacentes. Pode-se perceber, então, que um parâmetro fundamental ao isolamento de ruído de impacto é a rigidez do sistema.

Tipicamente os materiais utilizados nos elementos construtivos têm um amortecimento interno muito reduzido o que provoca uma dissipação de energia muito pequena e, conseqüentemente, uma grande propagação e radiação da energia por parte dos elementos (PINTO, 2011). Quando verificado o nível de pressão sonora de um ambiente, sujeito a um vizinho que seja fonte de ruído de impacto, a este é conferido o nome de nível de ruído de impacto, L_i . A fim de estudar o isolamento quanto a ruídos de natureza impulsiva, deve-se padronizar os valores determinados a partir de medições *in loco*, se utiliza das Equação 13 e 14.

$$L'_n = L_i + 10 \cdot \log\left(\frac{A_{eq}}{A_0}\right) \quad (13)$$

L_n = nível de pressão sonora de impacto normalizado(dB);

L_i = nível de ruído de impacto na sala receptora (dB);

A_0 = absorção sonora de referência para 10 m²

A = absorção sonora total da sala receptora (Sabine).

$$L'_{n,T} = L_i - 10 \cdot \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (14)$$

$L'_{n,t}$ = nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado (dB);

L_i = nível de ruído de impacto na sala receptora (dB);

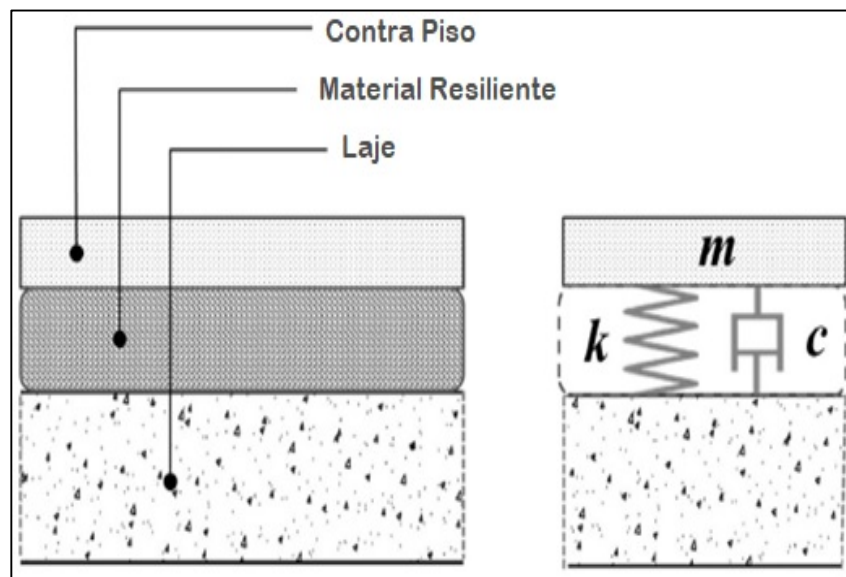
T = tempo de reverberação na sala receptora (dB);

T_0 = tempo de reverberação de referência igual a 0,5 ;

Nota-se então, que quanto menos energia a estrutura absorver, pior será para o isolamento de ruído de impacto. A fim de incrementar o isolamento ao ruído de impacto, é muito comum inserir amortecimento ao sistema. Quando se faz cobertura da região do pavimento exposta a choques com carpete, por exemplo, está sendo inserida uma variável no sistema que auxilia a não propagar a energia inerente ao choque. Este amortecimento oriundo do material adicionado ao sistema, está relacionado a uma propriedade dos materiais conhecida por resiliência. Tal característica é a capacidade que os materiais possuem de se deformar, frente a tensões a eles aplicadas, de forma elástica, recuperando assim, a sua dimensão inicial ou muito próximo disso.

Pensando no pavimento de uma edificação, com um sistema construtivo fora dos padrões adotados atualmente em obras, com a inserção de materiais tipicamente resilientes, entre as camadas de concreto que o compõe, especificamente entre a laje e o contrapiso, tem-se a metodologia conhecida como pisos flutuantes. Estes pisos, possuem como ideia fundamental, propor a partir da inserção de materiais resilientes na estrutura, a formação de um sistema massa-mola, no qual o material inserido faça papel de mola, absorvendo a energia que seria transmitida, tal qual mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de piso flutuante, e associação teórica com modelo massa mola



Fonte: Schiavi (2017).

3.8 EXIGÊNCIA DE CONTROLE DE RUÍDO EM EDIFICAÇÕES

Na atualidade, as grandes quantidades de estudos, bem como a série de normatizações e investimentos na área, mostram que existe uma crescente tendência em buscar ambientes mais confortáveis do ponto de vista acústico. As consequências de um ambiente ruidoso são muitas, e geralmente de conotação negativa, como baixa produção, má qualidade no sono, perda de concentração, enfermidades e assim por diante.

Com o desenvolvimento sócio econômico das grandes cidades deu-se, também, um crescimento no setor civil, e diversas edificações surgiram em curtos espaços de tempo. O incômodo, causado por unidades vizinhas, em edifícios residenciais e comerciais, é conhecido há muito tempo, porém, teve sua faixa de ocorrência amplificada por conta deste desenvolvimento. Comprovação disto é o fato de países da Ásia, tal como o Japão, possuir padrões de performance ao isolamento sonoro, formulado pelo instituto arquitetônico do Japão, em 1979, e países da Europa, como Portugal, possuírem normas regulamentadoras em vigor que norteiam o desempenho de edificações, no que tange a acústica, datadas no ano de 2002, com correções datadas no ano de 2007.

No Brasil, a partir do ano de 2013, entrou em vigor a norma NBR 15575 intitulada Edificações Habitacionais – Desempenho. Esta norma é dividida em seis partes e trata basicamente de recomendações para alcançar o melhor desempenho de uma construção habitacional, estabelecendo procedimentos e também valores recomendáveis a determinados parâmetros que permitem avaliar a construção como ótima, do ponto de vista de desempenho energético, térmico e acústico. Para o caso do objeto de estudo deste trabalho, fabricação e avaliação de contrapisos com borracha triturada como material agregado, que atenuem ruído de impacto, a parte 3 da norma, sintetizada na Tabela 1, é a que faz as recomendações de valores a serem usados como referência para os sistemas de pisos, tanto para uso privativo como uso comum.

Tabela 1 - Requisitos NBR 15575-3 limites normativos de isolamento ao ruído de impacto.

Isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso					
Parâmetro		Critério	Desempenho		
Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado	L'nt,w	Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	MIN 80dB	INT 65dB	SUP 55dB
		Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, tais como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, unidades habitacionais autônomas)	55dB	50dB	45dB

Fonte: tabela adaptada de Proacústica (2013).

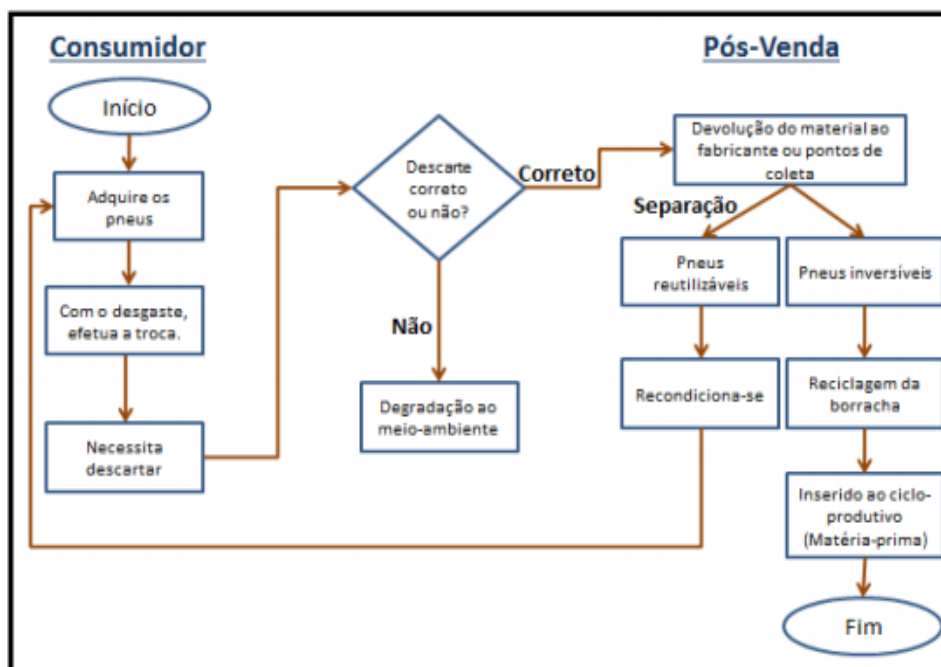
3.9 GANHO SOCIOAMBIENTAL NA UTILIZAÇÃO DE BORRACHA TRITURADA DE PNEU

No Brasil, pelo menos 450 mil toneladas de pneus são descartadas por ano, de acordo com dados do Serviço Social de Transporte (SEST 2018), o que equivale a cerca de 90 milhões de unidades utilizadas em carros de passeio. Exigências normativas estabelecem o recolhimento de pelo menos 70 quilos de pneus usados a cada 100 quilos que são colocados à venda ao consumidor no mercado doméstico. Entretanto, uma grande quantidade ainda é descartada de maneira inapropriada, gerando um enorme prejuízo socioambiental.

A decomposição do pneu no meio ambiente demora em torno de 600 anos, sem falar na sua capacidade de se tornar criadores de mosquitos como o *Aedes Aegypti*, transmissor da dengue, da Zika e da Chikungunya, devido ao acúmulo de água parada. Adicionalmente, devido ao descarte inadequado, vários pneus acabam em rios, o que colabora para a poluição do mesmo e também para a formação de enchentes. Estes fatores só reforçam a importância da utilização de pneus reciclados em aplicações que valorizem seu reaproveitamento.

Atualmente, existem alguns pontos de coletas de pneus usados, no que as empresas responsáveis pela coleta inicialmente fazem uma triagem dos pneus. Aqueles que ainda podem ser reutilizados, são aproveitados em aplicações similares ao seu uso original. Os exemplares que não podem ser utilizados que seguem para a reciclagem, onde são desmontados o máximo possível para serem retirados o aço e o cobre de suas estruturas e qualquer outro material existente que não seja borracha. Depois desta etapa o pneu é cortado em lascas e purificado em sistema de peneiras. O produto obtido pode então ser refinado em moinhos até a obtenção de uma manta uniforme ou triturado para a obtenção de grânulos de borracha. As etapas do processo de reciclagem são ilustradas no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de operações de reciclagem



Fonte: INDRUINAS, 2012.

A borracha triturada, proveniente de pneus reciclados, cuja utilização em novas aplicações da construção civil também faz parte do foco deste trabalho, pode ser usada para algumas finalidades como cobrir áreas de lazer e quadras esportivas, fabricar tapetes para automóveis, saltos e solados para sapatos, colas e adesivos, câmara de ar entre outros produtos. Neste trabalho é sugerida uma nova aplicação à borracha triturada a partir da adição ao cimento utilizada como contrapiso de edificações. E como a adição da borracha triturada é feita através de um processo simplificado, obter-se-iam ganhos de produtividade, além dos ganhos socioambientais.

Segundo a NBR 13.281 (ABNT, 2005), o contrapiso é constituída por uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água. Podem ainda ser adicionados alguns produtos especiais (aditivos ou adições), com a finalidade de melhorar ou conferir determinadas propriedades ao conjunto, para atender a finalidade de utilização da argamassa. Neste contexto, o contrapiso consiste em uma camada de argamassa ou enchimento aplicado sobre um terreno, laje ou sobre uma camada intermediária de isolamento ou de impermeabilização. (BARROS; SABBATINI, 1991).

A definição dada por Godoy e Barros (2000) é que o contrapiso de argamassa é uma camada única lançada sobre a laje estrutural, que deve apresentar características como espessura, rugosidade superficial, resistência mecânica, porosidade e durabilidade. Souza (2013) acrescenta que a espessura usual para contrapiso é de 2 a 6 cm e que o contrapiso tem, entre outras funções, nivelar e absorver deformações, servindo também para melhorar a acústica, dependendo do método construtivo e da necessidade. Barros e Sabbatini (1991) apontam que um projeto de contrapiso deve considerar as interfaces com o projeto estrutural (características da base, como resistência e deformabilidade), arquitetura (características do revestimento de piso, níveis de piso acabado e declividades de áreas molháveis), instalações (posicionamento e dimensões de tomadas de piso e tubulações embutidas) e impermeabilização (dimensões da área impermeabilizada e sistema utilizado).

Quanto ao traço para argamassas destinadas ao contrapiso, Barros e Sabbatini (1991) citam o traço 1:3, em volume, mas criticam o consumo excessivo de aglomerantes. Carasek (2006) relata que a versão antiga da NBR 7200 (ABNT, 1982) recomendava argamassas mistas com traço em volume de 1:2:9 a 1:2:11, porém a versão atualizada não apresenta essas proporções. O estudo de Godoy *et al.* (2000) optou em trabalhar com argamassa no traço 1:3 em volume, visto ao número de referências indicando este traço.

4. METODOLOGIA

Inicialmente foi determinado o tipo de resíduo a ser estudado na confecção do contrapiso para o isolamento de impacto. Assim procurou-se realizar os estudos e análises do resíduo do pneu reciclado triturado. A borracha usado na confecção das amostras foram doado pela empresa recicladora de pneus (Recanorte) na cidade de Parauapebas PA.

Uma vez escolhido o tipo de material isolante para a realização do estudo, realizou-se a caracterização física do mesmo por meio da análise granulométrica. Seguindo a literatura sobre o uso de resíduos na confecção de contra pisos com materiais reciclados, determinou-se os traços iniciais das amostras. Em seguida foi averiguada a relação água-cimento para confeccionar as amostras com resíduo e cimento. Com as amostras curadas foram realizado os ensaios referente ao isolamento do ruído de impacto.

Para que fosse possível realizar os ensaios de ruído de impacto, foram necessárias adaptações na câmara reverberante no Laboratório de Acústica da UFPA-CAMTUC. Após as devidas adaptações na câmara foram construídos as amostras para simular um contrapiso.

Na sequência será descrito o roteiro de atividades planejadas como caminho para alcançar os objetivos anteriormente mencionados neste trabalho. A metodologia do trabalho foi dividida basicamente em cinco etapas: Adequação da câmara; Construção das amostras; Instalação dos equipamentos de medição na câmara; Medições acústicas; e Análise dos resultados.

4.1 ADEQUAÇÃO DE UMA CÂMARA REVERBERANTE PARA ENSAIOS E QUANTIFICAÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO

Para a viabilização do projeto proposto nesse trabalho, foram feitas as adequações em uma câmara reverberante existente no Laboratório de Acústica e Mecânica Computacional de Engenharia Mecânica UFPA-CAMTUC.

As dimensões internas adotadas no projeto da câmara são de 1,60 m de largura (A), 2,0 m de comprimento (B) e 2,5 m de altura (C). A partir destas dimensões, o volume da câmara em escala fica sendo de 8 m³. Todas as paredes e teto da câmara foram construídas em concreto armado com 100 mm de espessura e sua porta de acesso é feita de aço maciço com 8 mm de espessura. Na figura 10 é demonstrado as etapas de construção Loss e Cassiano (2017).

Figura 10 - Etapas de construção da minicâmara: (a) formas de madeira para preenchimento com concreto, (b) câmara após a cura do concreto e (c) após a instalação da porta e ferragens.



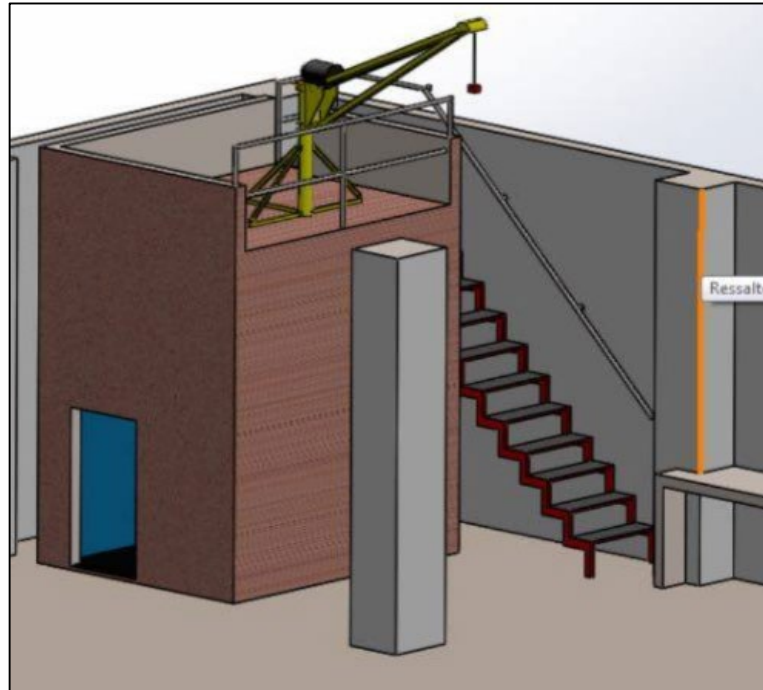
Fonte: Guerra e Andrade Júnior (2017).

Para que câmara reverberante pudesse realizar ensaios de ruído de impacto foi necessário uma serie de adaptações, com intuito simular uma divisão de cômodos superior e inferior de uma edificação, captando o ruído da fonte geradora no nível do piso, no interior da câmara por meio dos equipamentos de medição. As adaptações feitas na câmara foram:

- Elevação do teto do laboratório para tornar possível o acesso ao piso superior da câmara reverberante.
- Produção de uma escada lateral para acesso ao teto da câmara.
- Construção de paredes laterais, como requisito de segurança para trabalhos no teto da câmara.
- Fixação de uma talha manual, para auxiliar na elevação e posicionamento dos corpos no teto da câmara.

Foi criado o desenho em 3D, para auxiliar nas obras de construção das adaptações da câmara reverberante, essas adaptações foram fundamentais para que pudesse dar prosseguimento ao presente trabalho. Nas figuras 11 e 12 são mostradas as adaptações feitas na câmara.

Figura 11 - Projeto em CAD da adaptação da câmara reverberante para teste de ruído de impacto



Fonte: Autoria Própria

Figura 12 - Câmara pronta para uso pós adaptações



Fonte: Autoria Própria

Vale ressaltar que a câmara ainda precisa passar por algumas melhorias para se tornar mais funcional, como por exemplo um arranjo de engenharia com intuito de posicionar melhor a talha manual.

4.2 CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS

Como mencionado anteriormente, o intuito deste trabalho é produzir uma alternativa de reduções no ruído de impacto com baixo custo e de fácil aplicação, visando empreendimentos de menor orçamento. Por tanto, o material empregado na fabricação do corpo de prova foi um material reclinado de fácil acesso e manuseio que não precisa de uma mão de obra especializada.

Nesse trabalho, o material agregador utilizado junto ao concreto, foi a borracha triturada oriunda de pneu reciclado. A borracha foi doada pela empresa de recapagem Recanorte situada no município de Parauapebas Pará. No processo de recapagem são separados os pneus aptos dos não aptos a recapagem sendo que os considerados não aptos são retirados os materiais metálicos estruturais do pneu, deixado somente a borracha, para posteriormente passar por um processo de trituração. A borracha triturada doada, passou por um processo simples e manual para separação de pedaços de granulometria maiores antes de ser aplicada, como é mostrado na figura 13.

Figura 13 - Borracha triturada usada nas amostras



Fonte: Autoria própria

Na fabricação do contra piso com borracha, foi utilizado a medida mais usual para o contra pisos, uma medida de cimento para três medidas de areia. Inicialmente foram

confeccionadas três amostras com dimensões de 1000 mm por 1000 mm com 100 mm de espessura, substituindo 10 %, 20 % e 30 % respectivamente da areia empregada por borracha triturada. Posteriormente, foram feitas mais três amostras com a mesma porcentagem de borracha e dimensões, no entanto, com espessura de 60 mm. Devido a espessura de 100 mm não ser a convencional a construção dos contrapisos usuais encontrados na construção civil, geralmente o usual varia em torno de 30mm a 60 mm. Abaixo as figuras 14,15 e 16 retratam como ficaram as amostras.

Figura 14 - Contrapisos de 10 %, 20 % e 30 % com borracha e 100mm de espessura.



Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Contrapisos de 10 %, 20 % e 30 % com borracha e 60mm de espessura.



Fonte: Autoria própria

Para o início dos ensaios, foram retirados os moldes de madeira das placas de contrapisos e em seguida foi içada até o piso superior da câmara com o auxílio de uma talha manual, as amostras foram posicionadas de maneira a ter a máxima aderência entre a laje e o contra piso. Durante os ensaios, as amostras de 100 mm de espessura estavam com um total de 21 dias de tempo de cura, enquanto as de 60 mm se encontrava com 10 dias de cura, como mostrado na figura 16.

Figura 16 - Amostras posicionadas no piso para realização dos ensaios .



Fonte: Autoria própria

4.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA

Para a avaliação acústica do sistema de pisos foram feitas adaptações a norma NBR 15575, pois a norma, faz menção trata de medições em campo de transmissão de ruídos aéreo e de impacto, no intuito de avaliar o desempenho do sistema de piso como isolante acústico de uma forma geral. Porém nesse trabalho levou se em conta apenas a medições de ruído de impacto que é o foco do trabalho, para validação dos valores obtidos como desempenho do sistema de piso com agregado.

Quanto aos equipamentos utilizados, para a simulação do ruído de impacto foi utilizado uma máquina simuladora de passos (*Tapping Machine*), que pode ser aplicada para medições tanto em medições mais leve como o caminhada de uma pessoa ou mais intenso como a queda repentina de um objeto, a figura 17 representa a máquina utilizada nos ensaios.

Figura 17 - Tapping machine.



Fonte: Brüel & Kjaer.

A *tapping machine* possui cinco martelos, cada martelo tem 500 g e opera a 2 Hz a uma altura de 40 mm, fornecendo uma frequência total de operação de 10 Hz, sendo que cada um dos martelos tem tempo diferente para alcançar o fim de curso. De acordo com o procedimento de medição da norma a *tapping machine* deve ser posicionada em pelo menos quatro pontos diferente e em conjunto com a variação de posicionamento da máquina. Na figura 18 é mostrada a máquina sobre uma amostra.

Figura 18 - Tapping machine posicionada sobre uma amostra.



Fonte: Autoria própria

Para medir o nível de pressão sonora na sala receptora se utilizou um medidor de nível de pressão sonora e um amplificador de sinal da *Brüel & Kjaer*, conforme mostrado na figura (19). Foi utilizado um microfone de campo difuso tipo 4943 – ½ polegada, 3,15 Hz a 10 kHz, do mesmo fabricante ilustrado na figura (20).

Figura 19 - Medidor de pressão sonora e amplificador de sinal.



Fonte: Autoria própria

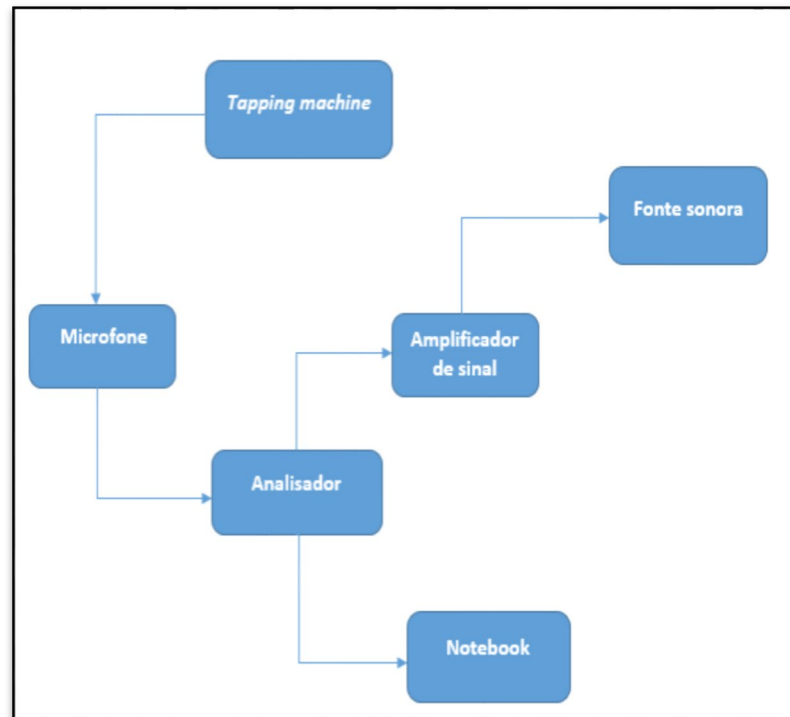
Figura 20 - Microfone de campo difuso.



Fonte: Autoria Própria

Por fim, após montada a cadeia de medição usada para avaliação acústica do piso com agregado de borracha como material absorvedor de energia, tem-se a câmara reverberante representada como a sala receptora do ruído, com o microfone posicionado em seu interior, a laje da câmara junto com as amostras de contrapisos simulam o piso do andar de cima e conseqüentemente o conjunto que se deseja avaliar, a *Tapping Machine* está posicionada diretamente em cima do sistema mencionado, na Figura 21 e 22 são mostrados o fluxograma da cadeia dos equipamentos de e um layout da bancada de ensaio de ruído de impacto.

Figura 21 – Esquema da cadeia de medição durante os testes de ruído de impacto.



Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Cadeia de medição ruído de impacto.



Fonte: Tutikian (2017).

Com os equipamentos devidamente instalados, foi dado início aos ensaios. Durante os ensaios a *tapping machine* foi posicionada no meio e depois nas quatro extremidades da amostra. Cada vez que a *tapping machine* mudava de posicionamento era realizada uma medição. O mesmo procedimento foi aplicado a todos os seis corpos de prova, atendendo, assim, os procedimentos especificados na NBR 15575

4.3 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste tópico serão discutidos os procedimentos utilizados para realizar as medições acústicas nas amostras produzidas neste trabalho, fazendo as análises necessárias para que se obtenha uma boa discussão sobre os resultados, além da exposição de possíveis falhas ou necessidades de novos estudos a serem realizados.

4.3.1 Ensaios de isolamento do ruído de impacto

Os ensaios realizados para medir o isolamento do ruído de impacto seguiu a ISO 140-7 (ISO, 1998b) quanto ao procedimento, a ISO 140-8 (ISO, 1997) quanto à tipologia das amostras e a ISO 717-2 (ISO, 1996) para obter o valor único ponderado do nível de pressão sonora de impacto padronizada e ponderada. As amostras foram feitas segundo a ISO 140-8 (ISO, 1997), de forma que seus tamanhos fossem suficientemente grandes para instalar a máquina de impacto.

4.3.2 Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada

Os níveis de pressão sonora foram medidos com a máquina de impacto em funcionamento, o tempo de reverberação na câmara receptora já era conhecido para cada faixa de frequência decorridos de ensaios anteriores. Na medição do nível de pressão sonora fez-se a leitura por terças de oitavas, indo de 125 Hz até 3150 Hz.

Utilizou-se uma posição da placa de contrapiso de 1m² sobre a laje padrão e uma posição de microfone fixo na sala. Em cima do contrapiso foram 5 posições diferentes para locação da máquina de impacto até o fim dos ensaios, na figura 22 é mostrada a máquina sobre uma amostra a ser ensaiada.

Figura 23 - Posição inicial da máquina para realização dos ensaios



Fonte: Autoria propria

Para cada amostra foram realizados 5 medições com a máquina posicionada em cinco posições diferentes e padronizadas sobre a amostra, assim para cada amostra obtivesse 5 resultados de (L_i), desta forma tirou-se a média dessas 5 medições a fim de se obter resultados mais confiáveis.

Com os valores do tempo de reverberação da câmara para cada faixa de frequência e os valores obtidos nos ensaios para o nível de ruído de impacto (L_i) na sala receptora, calculou-se o nível de pressão sonora padronizada por terças de oitavas (L'_{nt}), por meio da equação (14) listada anteriormente, foram calculados todos os valores de (L'_{nt}) para as respectivas faixas de frequência. De posse dos valores de (L'_{nt}), seguindo a norma ISO 717-2 (ISO, 1996) por meio da curva de ajuste foram encontrados os valores de ($L'_{nt,w}$) para cada amostra e também para a laje, os valores de ($L'_{nt,w}$) são os valores de referência utilizados pela norma NBR 15575, que avalia e classifica os níveis de ruído de impacto em edificações.

A ISO 717-2 (ISO, 1996) estabelece uma curva padrão à qual os ensaios do nível de pressão sonora de impacto deve se ajustar. O ajuste foi realizado da seguinte forma: acrescentou-se ou diminuiu-se à curva padrão 1 dB até que a soma da diferença dos valores positivos entre os resultados de ensaio e a curva ajustada não ultrapassassem de 32 dB. O valor único adotado foi o referente a 500 Hz.

4.3.3. Acústica normalizada

Os ruídos aéreos e o de impacto gerados no sistema de pisos em unidades de edificações são medidos por meio da norma NBR 15575, no intuito de avaliar o desempenho do sistema de piso como isolante acústico de uma forma geral. No entanto, para o desenvolvimento dos estudos deste trabalho levou-se em consideração somente a avaliação do piso quanto a atenuação do ruído de impacto, por meio das adaptações realizadas na câmara reverberante do laboratório de acústica da UFPA campus Tucuruí PA, que a partir da modificação passou a ter uma estrutura que represente uma edificação habitacional em escala real. Adicional a isto, tem-se o fato de que a atenuação do ruído aéreo está intimamente ligada a qualidade do acoplamento feito entre componentes estruturais da edificação, fugindo ligeiramente dos objetivos deste trabalho que estão entrelaçados aos valores obtidos como desempenho das mantas acústicas.

Assim, a primeira norma que fora utilizada por este trabalho, seguindo a recomendação da NBR 15575, fora a norma ISO 140-7:1998, Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors (ISO 140-7:1998, Acústica – Medições de isolamento sonoro em edificações e de elementos de edificações – Parte 7: Medições em campo do isolamento de ruído de impacto de pisos). Esta norma trata das recomendações quanto aos procedimentos usados para realizar a medição em campo da atenuação do ruído de impacto, no entanto pode-se ver que a mesma é de 1998, e em 2015 fora publicada uma norma que vem a substituir a anteriormente citada, atualizando as recomendações dos procedimentos sob o mesmo título com número diferente, à saber a norma ISO 16283-2:2015. Por razões cronológicas a NBR 15575 ainda se reporta a ISO 140-7:1998, haja vista que fora publicada em 2013, dois anos antes da publicação da ISO 16283-2:2015.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

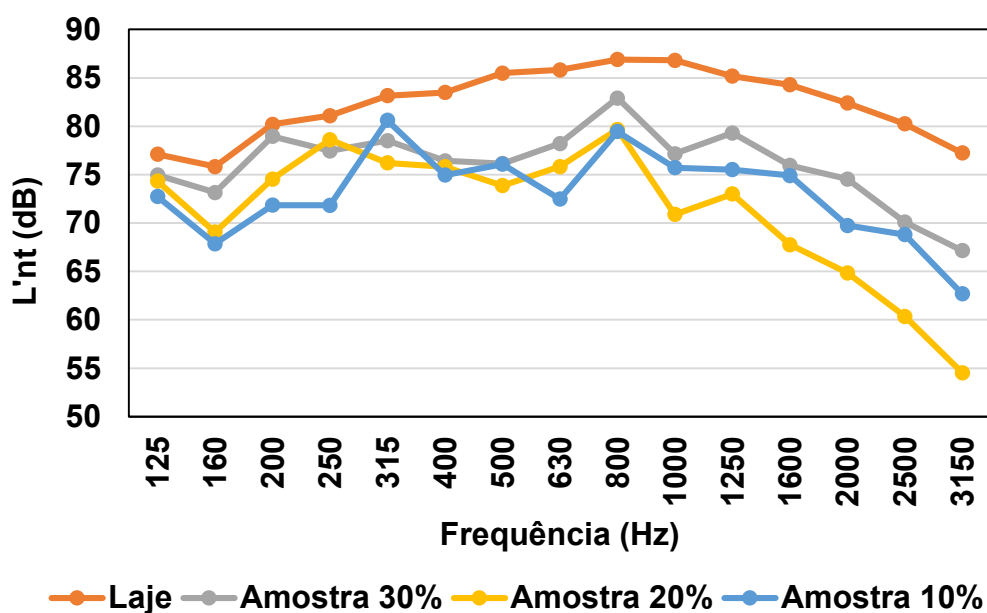
Neste capítulo serão expostos e comentados os resultados obtidos em cada etapa deste trabalho. Realizando as análises dos resultados obtidos e comparando os ganhos acústicos com relação as normas. Seguindo a mesma ordem da seção anterior (Acústica).

5.1 ANÁLISE ACÚSTICA

Assim para avaliar o comportamento do resíduo (borracha de pneu triturada) na construção de contra pisos quanto ao ganho em isolamento acústico, o ensaio foi repetido para diferentes espessuras de contra piso, neste estudo, em específico, foram usadas espessuras de 60 mm e 100 mm, variando o percentual em 10%, 20% e 30% de borracha adicionada em substituição a areia nas amostras, assim obteve-se seis amostras a serem ensaiadas, além de realizado também o ensaio diretamente na laje sem o contrapiso para servir de referência quanto ao ganho acústico.

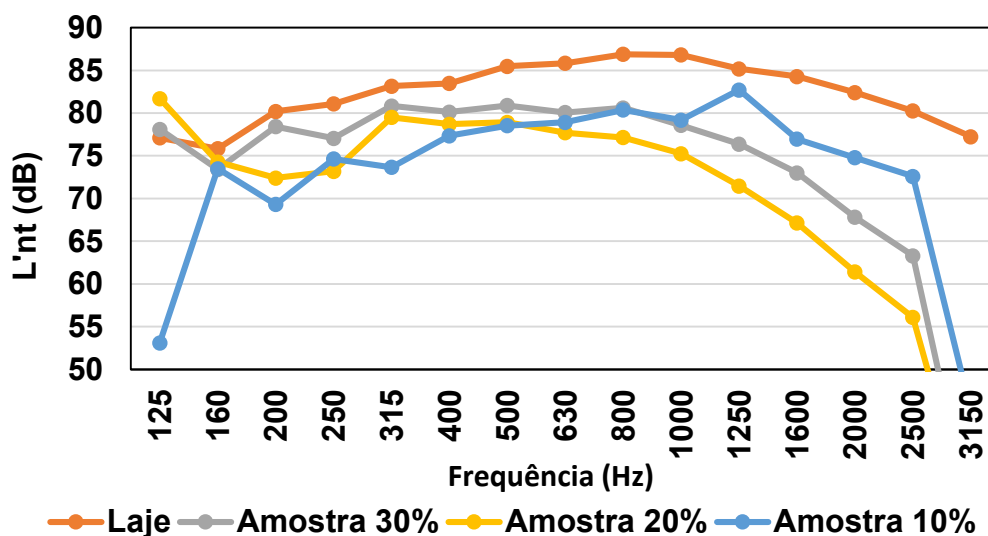
Seguindo as normas ISO mencionadas anteriormente foram realizadas as medições para os níveis de ruído de impacto (L_i), que se baseia em recomendações da norma nacional vigente (NBR 15575). Na Figura (24), tem-se todas as plotagens dos valores obtidos para os níveis de pressão sonora de impacto padronizada em cada amostra com espessura de 100mm, e da laje.

Figura 24 - Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada



Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizada



Fonte: Autoria própria

A Figura 24 e 25 mostram os valores dos níveis de pressão sonora padronizada (L'_{nt}) em (dB) a cada intervalo de frequência, porém o valor que atende a norma NBR 15575 no quesito desempenho acústico ao ruído de impacto em unidades habitacionais é o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nt,w}$), que por sua vez é obtido de acordo com a ISO 717-2 (ISO, 1996), que estabelece uma curva padrão à qual os ensaios do nível de pressão sonora de impacto deve se ajustar. O ajuste foi realizado da seguinte forma: acrescento-se de 1(dB) por vez em cada frequência da curva padrão ISO, até que a soma da diferença dos valores positivos entre os resultados de ensaio (L'_{nt}) e a curva ISO ajustada não ultrapassassem de 32 dB, desta forma obtense a curva ISO ajustada, na curva ISO ajustada o valor referente do nível de pressão sonora na faixa de 500 Hz, é o valor que a norma NBR 15575-3 considera como valor do nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nt,w}$).

Nos gráficos do Apêndice A é mostrado a curva ISO de referência, assim como a curva ISO ajustada após seguir o procedimento descrito anteriormente (ISO 140-7), o ($L'_{nt,w}$) foi de 74 dB para as amostras de 100 mm e 60 mm com percentuais de 20%, esses foram os melhores resultados dos ensaios.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a NBR 15575-3 para a avaliação do desempenho acústico de edificações, nela foram determinados critérios para análise do isolamento do ruído de impacto com referência à ISO 140-7 (ISO, 1998b). Para que seja feita a avaliação da amostra ensaiada, a NBR 15575 expõe faixas

de desempenho de acordo com o valor de $(L'_{nt,w})$ determinado para amostra, como evidencia a Tabela 2.

Tabela 2 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderada

Parâmetro	Critério	Desempenho		
		MIN	INT	SUP
$L'_{nt,w}$	Sistema de piso separando unidades	\leq	\leq	\leq
		80dB	65dB	55dB

Fonte: Adaptado de NBR 15575-3:2013.

Desta forma, de acordo com a NBR 15575-3, tem-se para os ensaios demonstrados nas figuras 23 e 24, que para as (Amostra 20% borracha triturada, contrapiso de 100mm e 60mm), obteve a classificação de desempenho mínima, uma vez que o valor de $(L'_{nt,w})$ foi de 74 dB.

Os gráficos, que estão disponíveis no Apêndice A para consulta. Para uma melhor apresentação dos resultados foram agrupados os melhores resultados de cada tipo de contrapiso em grupos em função da espessura utilizado, abaixo nas Tabelas (3) e (4).

Tabela 3 - Resultados para contra piso com 60 mm de espessura.

Amostra	$L'_{nt,w}$
Laje no Padrão Construtivo Convencional	88
Contra piso 10% Borracha	81
Contra piso 20% Borracha	74
Contra piso 30% Borracha	78

Fonte: Autoria própria

Conforme a Tabela 3, Também foram realizados ensaios na laje da câmara reverberante sem que houvesse inserção de qualquer material absorvedor que fosse capaz de atenuar o ruído de impacto, esse seria o ponto de partida para os demais ensaios. O ensaio da laje no padrão convencional sem tratamento acústico, serviu como valor de referência para se estipular o quanto o material usado no ensaio auxiliou na redução do ruído. Em seguida foram realizados os ensaios das outras três amostras. Por fim, pode-se destacar que o contrapiso composto 20 % com borracha triturada reciclada obteve o melhor resultado entre as três amostras de 60 mm de espessura, porém, seu desempenho

segundo a NBR 15575-3 ficou na classificação mínima, uma que seu valor de $L'_{nt,w}$ foi de 74 dB. Comparado com o resultado dos ensaios da Laje houve uma redução de 14 dB, o que demonstra a eficiência nos contrapisos com o uso da borracha triturada.

Tabela 4 - Resultados para contrapiso com 100 mm de espessura.

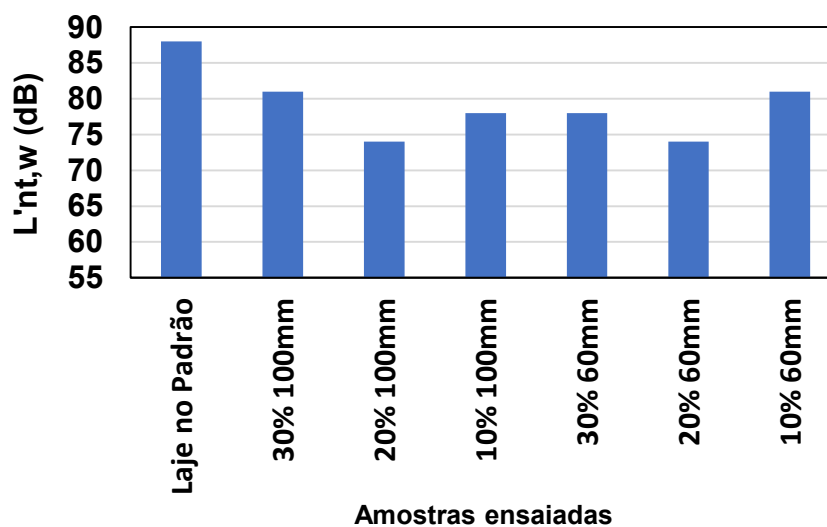
Amostra	$L'_{nt,w}$ (dB)
Laje no Padrão Construtivo Convencional	88
Contra piso 10% Borracha	78
Contra piso 20% Borracha	74
Contra piso 30% Borracha	81

Fonte: Autoria própria

Conforme os resultados da Tabela 4, pode-se perceber que o aumento na espessura do contra piso não contribuiu positivamente para o desempenho acústico, uma vez que os resultados só se alteram nas amostras de 10% e 30% sendo que essas não foram as de melhor desempenho. Novamente destacou-se o contrapiso com adição de 20 % de borracha triturada reciclada, que obteve o melhor resultado entre as três amostras de 100 mm.

Analisando os resultados e comparando as amostras de espessuras diferentes, tem-se uma tendência de não se obter ganho conforme o aumento da espessura, além de uma padronização ideal quanto ao percentual de material reciclado (borracha de pneu reciclado), que são as configurações de 20%, essa foi a melhor configuração segundo os ensaios, no que se refere ao desempenho acústico de pisos segundo a NBR 15575-3 conforme os resultados que estão na Figura (26), logo abaixo.

Figura 26 - Resultados das amostras para o $L'_{nt,w}$



Fonte: Autoria própria.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, na câmara reverberante do laboratório de acústica da UFPA campus Tucuruí-PA foram realizadas as adaptações mínimas necessárias para que seja possível a realização dos ensaios de ruídos de impacto em pisos, contra pisos e mantas acústicas, aumentando assim o leque de experimentos na área da acústica que possa vir a ser desenvolvida pelos discentes da instituição, contribuindo para o desenvolvimento acadêmico e socioeconômico da região. Foram construídas e ensaiadas amostras de contrapisos com material reciclado (borracha de pneu reciclado), a fim de se avaliar o quanto positivo seria em relação a diminuição do ruído de impacto, e as avaliações se deram principalmente em relação aos parâmetros acústicos das amostras.

Em se tratando do nível de pressão sonora de impacto padronizado e ponderado, $L'_{nt,w}$, ficou evidente que as amostras de 100mm e 60mm com o percentual de 20% de borracha reciclada apresentaram isolamento superior às demais, mesmo o melhor resultado das amostras ficou na faixa de classificação mínima segundo a NBR 15575-3, mesmo assim os resultados se fizeram satisfatórios uma vez que observou-se através das medições um ganho relacionado a diminuição do ruído de impacto comparando as amostras com adição de borracha em relação a laje sem tratamento acústico. Após os ensaios e com o resultados disponíveis observou-se que não se faz viável a utilização de contrapisos de maior espessura para controle do ruído de impacto, uma vez que não houve ganho acústico conforme o aumento da espessura, o que acarretaria apenas no aumento dos custos e no peso estrutural da edificação.

Em vista do procedimento experimental, resultados e discussões, todos os objetivos foram alcançados. No entanto pode-se observar em relação aos resultados do isolamento do ruído de impacto das amostras comparados entre si geraram um resultado diferente do esperado no que tange ao ganho acústico, uma vez que, se esperava que com o aumento da espessura e do percentual de borracha adicionado, tive-se uma diminuição do nível de ruído de impacto, o que acabou por não se confirmar. Por outro lado, os resíduos demonstraram um potencial para uso como material resiliente no isolamento do ruído de impacto, visto que todos os resultados obtiveram uma melhora do isolamento em relação às respectivas referências, no entanto mais amostras e novas configurações com novos percentuais e uma menor granulometria dos resíduos devem ser testados, com intuito de classificar no

desempenho intermediário e superior segunda as normas. Isso assegura a possibilidade de destinação desses resíduos na construção de contrapisos acústicos, no entanto, pesquisas mais profundas se tornam necessárias para averiguar a viabilidade técnica do material alternativo.

Vale ressaltar que o trabalho contribuiu para promover ações de cidadania dada a importância da utilização de materiais reciclados, na construção de novos produtos que favoreçam a conservação do meio ambiente, além de ajudar a manter aquecida a cadeia da indústria da reciclagem, o que de certa forma fomenta a geração de emprego e renda, e o desenvolvimento socioeconômico da região.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que os objetivos do trabalho foram alcançados e visando manter o caráter de continuidade dos estudos relacionados ao tema controle do ruído de impacto em pisos de edificações, algumas sugestões para trabalhos são aqui propostas:

- Repetir o estudo, com a fabricação de amostras com espessuras menores e com maior percentual de borracha, em maior quantidade para gerar um número maior de dados.
- Repetir o estudo, com uma granulometria menor possível, para observar o comportamento acústico.
- Realizar as adaptações restantes na câmara reverberante, tais como; construção da escada de acesso ao piso superior, instalação de uma mini ponte rolante para içar as amostras com segurança.
- Realizar nos trabalhos futuros os estudos sobre rigidez dinâmica, e ensaio de compressão das amostras, uma vez que neste trabalho foi avaliado somente a parte relacionada a acústica.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 10.152:1987. Níveis de ruído para conforto acústico. ABNT, 1987.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 15.575:2013. Edificações Habitacionais - Desempenho.
- ARAÚJO, H. R.** O mercado, a floresta e a ciência do mundo industrial. São Paulo: Estação Liberdade, 1998.
- ASDRUBALI, F, SCHIAVONI, S e HOROSHENKOV, K. V. 2012. **A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications.** *Building Acoustics*. 2012, Vol. 19.
- ASDRUBALI, F. D'ALESSANDRO, F. **A Methodology to Measure the Acoustic Performance of Access Floors.** ICA - International Congress on Acoustics. 19^a, 2007.
- BARROS, M. M. S. B. de. SABBATINI, F. H. **Tecnologia de produção de contrapisos para edifícios habitacionais e comerciais.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1991.
- BASTOS, L. P. 2009. **Desenvolvimento e caracterização de painéis multicamadas unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais.** Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA, 2009.
- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- Brüel & Kjaer, **Sound and Vibration Measurements. Enviromental noise.** B&K, 2000.
- COSTA, B.M et al 2017. **Análise Comparativa do Desempenho Acústico do Contrapiso Convencional e Produzido com Casca de Arroz com Diferentes Revestimentos.** Artigo acadêmico. São Leopoldo: UNISINOS, 2017.
- DEMARCHI, C. A. **Aplicabilidade de Fibras de Bananeira: caracterização, produção e absorção sonora.** Dissertação de Mestrado. Londrina: UEL, 2010.
- GERGES, SAMIR N. Y; **Ruído Fundamentos e Controle.** Florianópolis: NR Editora, 2000.
- GRISON, E. C., BECKER, E. J. e SARTOTI, A. F. 2010. **Borracha e seus aditivos: componentes, influências e segredos.** Porto Alegre: Suliani, 2010.
- GODOY, E.H,P; BARROS, M.M.S. **Diretrizes para produção de contrapisos ;** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia de Construção Civil, Sao Paulo, 2000.
- IBGE. 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010: Aglomerados Subnominais - Informações Territoriais.** 2010.

ISO, International Organization for Standardization. ISO 354: Measurements of Sound Absorption in a Reverberation Room. ISO:1999.

ISO, International Organization for Standardization. 2013. ISO 717-2:2013. Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements Part 2: Impact sound insulation. ISO, 2013.

ISO, International Organization for Standardization. 2015. ISO 16283-2:2015. Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation. s.l. : ISO, 2015.

ISO, International Organization for Standardization. 2010. ISO 10140-3. Acoustics - Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements. s.l. : ISO, 2010.

ISO, International Organization for Standardization. 1989. ISO 9052-1. Acoustics - Method for Determination of Dynamic Stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. s.l. : ISO, 1989.

ISO, International Organization for Standardization. 1998. ISO 140-7:1998. Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. s.l. : ISO, 1998.

PEDROSO, M. A.; SANTOS, J. L. P. **Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto.** In: IX ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2007, Ouro Preto. Anais do V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto: [s.n], 2007, p. 1385-1394.

PROACÚSTICA Associação Brasileira para Qualidade Acústica – **Guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da Norma ABNT NBR 15575:2013.** São Paulo: Editora O Nome da Rosa, 2015.

POLOPROBIO. **Polo de Proteção da Biodiversidade e Uso Sustentável dos Recursos Naturais.** [Online] [Citado em: 05 de Janeiro de 2017.] <http://www.poloprobio.org.br>.

SAMONEK, F. 2006. **A borracha vegetal extrativista na Amazônia: um estudo de caso dos novos encauchados de vegetais no estado do Acre.** Dissertação de Mestrado. Rio Branco : UFAC, 2006.

SCHIAVI, ALESSANDRO. 2017.. **Improvement of Impact Insulation: A constitutive model for floating floors.** Applied Acoustic. 2017.

SCHIAVONI, S., et al. 2016. **Insulation Materials for the Building Sector: A review and comparative analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016.

VIEIRA, R. J. A. **Desenvolvimento de Painéis Confeccionados a Partir de Fibra de Coco para Controle Acústico de Recintos**. Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA, 2008.

VINADÉ, R. dos S. **Estudo da Absorção Sonora de Arranjos Decorativos Contendo Espécies Vegetais**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria: UFSM, 2015.

LOSS, GUERRA; CASSIANO, ANDRAE. **Desenvolvimento e validação de uma câmara reverberante em escala reduzida para determinação de propriedades acústicas de materiais**. Trabalho de conclusão de curso do curso, Engenharia mecânica UFPA, 2014, Tucuruí-PA.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P. de; OLIVEIRA, M. F. de. **Uso de agregado leve de EVA em contra piso**. (2017)

APÊNDICE - Medições de Ruído de Impacto das Amostras de Contrapisos testadas.

Gráfico 1 - Nível de ruído de impacto para contra piso 100 mm com 10% borracha

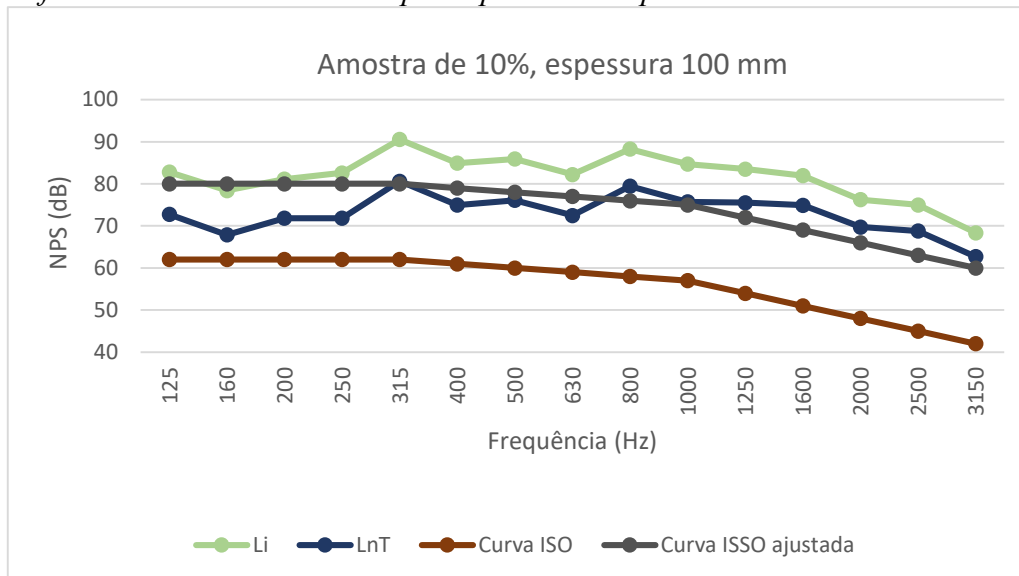


Gráfico 2 - Nível de ruído de impacto para contra piso 100 mm com 20% borracha

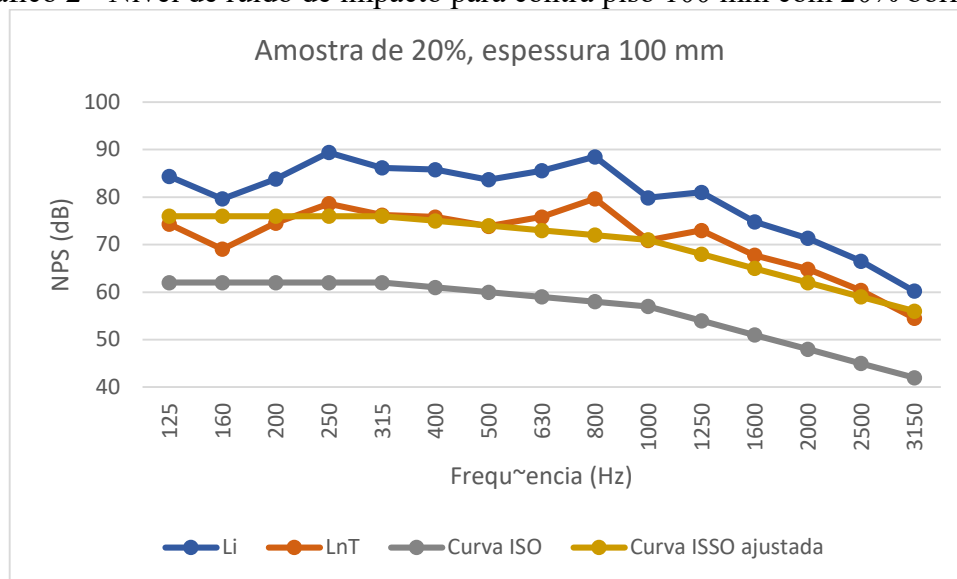
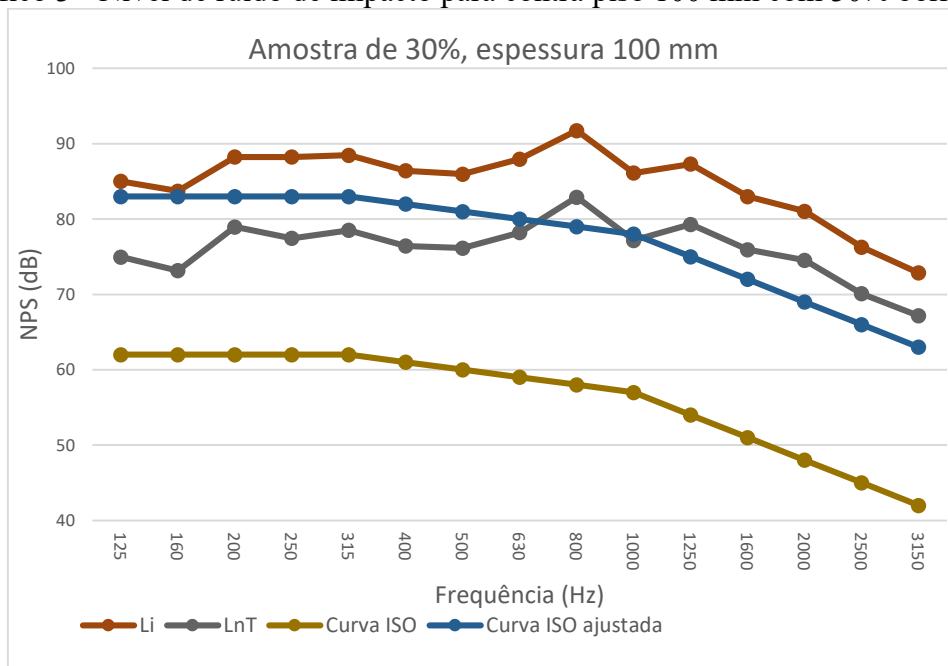
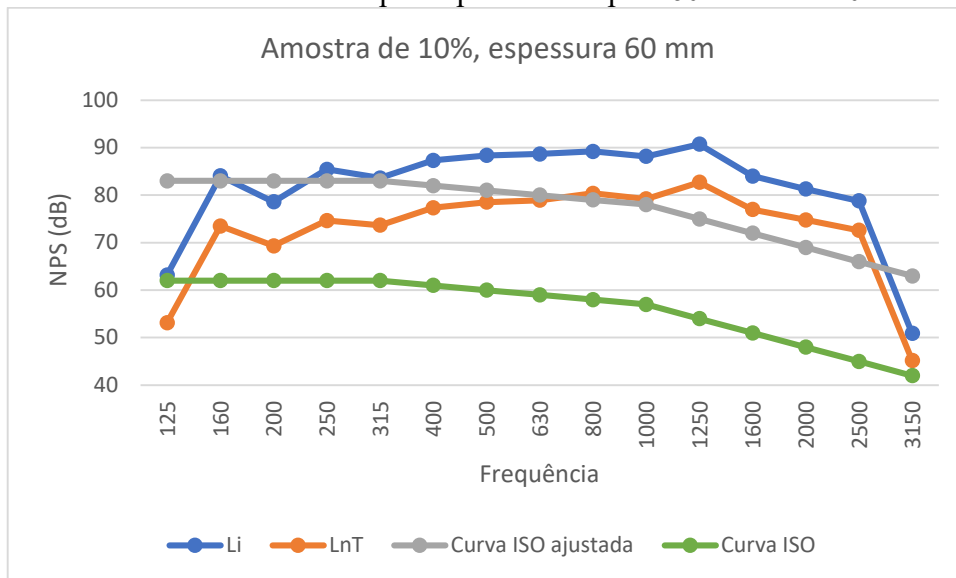


Gráfico 3 - Nível de ruído de impacto para contra piso 100 mm com 30% borracha.



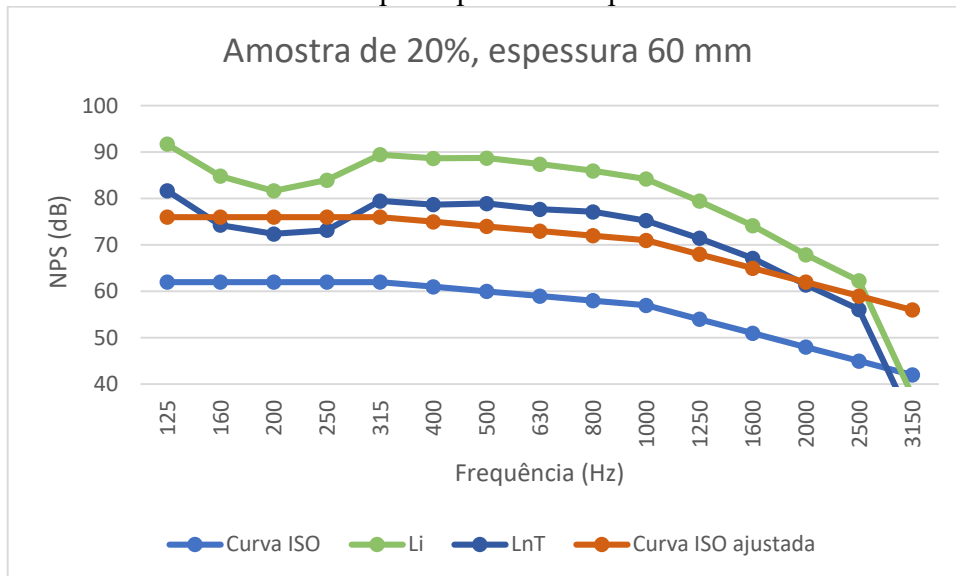
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4 - Nível de ruído de impacto para contra piso 60 mm com 10% borracha



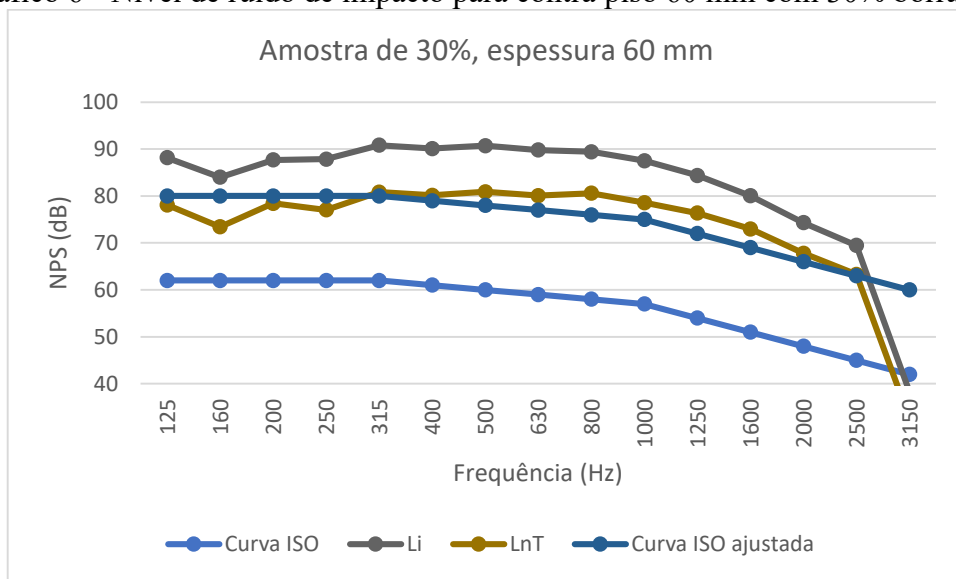
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5 - Nível de ruído de impacto para contra piso 60 mm com 20% borracha



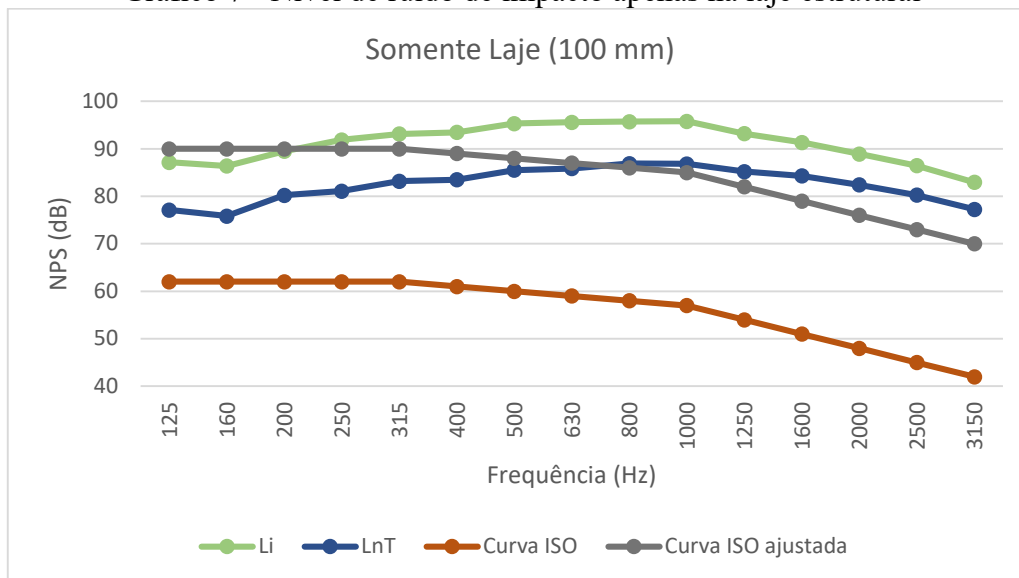
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 6 - Nível de ruído de impacto para contra piso 60 mm com 30% borracha.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 7 - Nível de ruído de impacto apenas na laje estrutural



Fonte: Autoria própria.