



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ADRIANE MARIA WARDERLEY OLIVEIRA

**PISOS FLUTUANTES: CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ
DINÂMICA APARENTE DAS CAMADAS RESILIENTES E
COMPARAÇÃO COM O DESEMPENHO ACÚSTICO**

JOÃO PESSOA

2016

ADRIANE MARIA WARDERLEY OLIVEIRA

**PISOS FLUTUANTES: CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ
DINÂMICA APARENTE DAS CAMADAS RESILIENTES E
COMPARAÇÃO COM O DESEMPENHO ACÚSTICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba como requisito
para a obtenção do título de Bacharela em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel

JOÃO PESSOA

2016

O50p Oliveira, Adriane Maria Warderley

Pisos flutuantes: caracterização da rigidez dinâmica aparente das camadas resilientes e comparação com o desempenho acústico – Adriane Maria Warderley Oliveira. – João Pessoa, 2016.

53f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) CGEC (Departamento de Engenharia Civil) DEC - Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Rigidez dinâmica, 2. ruído de impacto, 3. desempenho acústico. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADRIANE MARIA WANDERLEY OLIVEIRA

PISOS FLUTUANTES: CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DINÂMICA APARENTE DAS CAMADAS RESILIENTES E COMPARAÇÃO COM O DESEMPENHO ACÚSTICO

Trabalho de Conclusão de Curso em 08/06/2016 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Dr ROBERTO LEAL PIMENTEL - orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Profª Dra ANDREA BRASILIANO SILVA

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof Dr HIDELEBRANDT JOSÉ FARKAT DIOGENES

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dra ANA CLAUDIA FERNANDES MEDEIROS BRAGA
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Quero aproveitar este espaço para agradecer não, só aos que me ajudaram para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para agradecer àqueles que de alguma forma foram essenciais ao longo da minha jornada acadêmica até aqui.

À minha família, por estarem comigo em todos os momentos e entenderem os meus maus momentos por conta do estresse deste trabalho e de tantos outros ao longo dos cinco anos de graduação. Os anos de faculdade me fizeram menos doce, agradeço a vocês por entenderem isso. Agradeço principalmente a minha mãe, Wberlania, por ser o meu principal referencial na vida e a minha irmã Andreza por ouvir minhas lamúrias nos momentos ruins. Mesmo odiando lágrimas ela nunca me deixou sozinha.

Aos amigos desde o ensino médio Erickson Alves, Letícia Lúcia, Luiz Henrique e Priscila Aquino pelos mais de 10 anos de amizade e companheirismo. Da escola para a vida este é o lema.

Aos meus amigos e colegas da graduação, especialmente aos alunos da turma 2011.1, minha turma.

Aos amigos de todas as horas, um grupo muito querido: Adalice Duarte, Ramoon Bandeira, Vinicius Urquiza. Estes estiveram comigo desde o início nas horas boas e ruins. E a amizade e conversas desenvolvidas são as lembranças mais divertidas da minha graduação.

Aos colegas que se aproximaram ao longo do curso e tornaram-se amigos de verdade: Bianca Limeira, Luan Cardoso e Kelbson Werton.

Ao meu amigo, amado tão quanto um irmão, que fez todos os trabalhos comigo, que aturou minhas reclamações nos projetos, que nunca me deixou sozinha, que cuidou de mim. Enfim, agradeço a meu amigo e grande irmão Tiago Teotônio. A minha vida, tanto na UFPB como fora dela não seria a mesma sem ele.

A minha querida amiga Ana Rita com quem sempre pude contar quando o peso era demais. As palavras dela sempre me confortaram e acalmaram.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPB. Todos eles de alguma forma contribuíram para a minha formação. Agradeço especialmente ao professor Roberto Pimentel, meu orientador, por toda ajuda e conselhos para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao professor Hidelbrando Diogenes e a professora Andrea Brasiliano. Além de aceitarem participar da minha banca de avaliação os dois me ajudaram ao longo do desenvolvimento deste trabalho, desde empréstimo de livros a conversas para ajudar a manter a calma.

Por fim, agradeço aos alunos da pós graduação, orientandos do professor Roberto, Felipe e Fabianne que me ajudaram a realizar os ensaios de rigidez dinâmica utilizados neste trabalho.

Continue a nadar para achar a solução.

Dory, Procurando Nemo

RESUMO

O advento e tecnologias associados aos concretos de alto desempenho vêm possibilitando construções com vãos cada vez maiores e mais esbeltos. Tal situação resulta em estruturas mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos, culminando em edificações com maiores problemas associados ao ruído. Nesta conjuntura faz-se necessário entender a resposta da estrutura a ruídos de impacto e propor medidas mitigadoras deste ruído nas edificações. No âmbito das medidas mitigadoras sentiu-se a necessidade de estudar os materiais utilizados como camada resiliente nos sistemas de piso flutuantes. Este trabalho propôs-se a estudar a relação entre a rigidez dinâmica dos materiais resilientes utilizados em pisos flutuantes e o desempenho acústico dos sistemas de piso. A NBR 15575/2013 – Norma de desempenho de edificações foi a referência na análise do desempenho acústico dos sistemas de piso estudados. Para a determinação da rigidez dinâmica dos materiais foi utilizada a metodologia indicada na ISO 9052-1, norma americana para determinação de tal parâmetro. Os materiais resilientes ensaiados não se encontram no mercado, estão em fase de testes e os resultados apontam para rigidezes dinâmicas próximas aos valores de materiais comerciais.

Palavras chaves: rigidez dinâmica, ruído de impacto, desempenho acústico.

ABSTRACT

New technologies and techniques related to high performance concrete made it possible to build bigger and slender spans. This makes the structures more susceptible to dynamic loading and results in buildings with noise-related problems. It is necessary to understand how a structure behaves to impact noise and generate solutions to mitigate the noise on the building. In order to the mitigating solutions to work, it was necessary to study the materials used as a resilient layer on a floating floor system. This study proposition is to identify the relation between the dynamic stiffness of resilient material used in floating floors systems and its acoustic performance. The NBR 15575/2013 was chosen as the reference in acoustic performance analyses in floors systems. The ISO 9052-1 was the standard to the determination of dynamic stiffness. The resilient materials do not exist in the market, they are in testing phase, but the results points to dynamic stiffness's in the same range of market available materials.

Keywords: dynamic stiffness, impact noise, acoustic performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tipos de Ruído	20
Figura 2: Fontes Geradoras de Ruído de Impacto	22
Figura 3: Vibração Livre Não Amortecida	24
Figura 4: Frequências de Ressonância do Corpo Humano	27
Figura 5: Gráfico da Transmissibilidade em função da razão de Frequências	32
Figura 6: Modelo Simplificado em um grau de liberdade do Sistema de Piso Flutuante	33
Figura 7: Gráfico para Determinação da Frequência Crítica	34
Figura 8: Mantas de SBR	37
Figura 9: Gráfico de $L'nT,w$ em função da Frequência de Impacto para Manta de SBR	38
Figura 10: Amostra da Manta de Granulo de Pneu Reciclado	39
Figura 11: Gráfico de $L'nT,w$ em função da Frequencia de Impacto para Manta Sound Soft 5mm	40
Figura 12: Esquema de Ensaio	41
Figura 13: Espectro de Frequências Manta SBR - Verde	43
Figura 14: Espectro de Frequências Manta SBR - Amarela	43
Figura 15: Espectro de Frequências Manta SBR - Multicolorida 5mm	44
Figura 16: Espectro de Frequências Manta SBR Multicolorida 3mm	44
Figura 17: Espectro de Frequências Manta SBR - 7mm	44
Figura 18: Sinal em Domínio do Tempo Manta SBR - Amarela	45
Figura 19: Gráfico Relacionando Rigidez Dinâmica e Desempenho Acústico	48
Figura 20: Relação entre Espessura e Desempenho Acústico	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade de Propagação das Ondas de Vibração	18
Tabela 2: Pressão Sonora e Sensação Subjetiva	28
Tabela 3: Frequências Limites Superior estruturas submetidas a vibrações por indução humana	29
Tabela 4: Critério e nível de Pressão sonora de impacto padrão ponderado, L'nT,w.....	30
Tabela 5: Desempenho Acústico de Mantas de SBR Expandido	37
Tabela 6: Frequências obtidas através do Ensaio de Rigidez dinâmica	45
Tabela 7: Rigidez Dinâmica Aparente dos Materiais Estudados	46
Tabela 8: Rigidez Dinâmica obtida em ensaio x Valor Comercial – Manta Sound Soft 5mm	46
Tabela 9: Diferenças entre as placas de carga de referência e de ensaio - manta Sound Soft 5mm.....	47
Tabela 10: Melhoria no Desempenho Acústico - Sound Soft 5mm	47
Tabela 11: Rigidez Dinâmica e Melhoria no Desempenho para Mantas de SBR	48

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivos Gerais	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA.....	17
2.1.1 Som e Ruído	17
2.1.2 Conceitos Fundamentais do Som	17
2.1.3 Tipos de Ruído	19
2.1.4 Ruído de Impacto	21
2.2 RUÍDO DE IMPACTO: PRINCÍPIOS FÍSICOS	22
2.2.1 Vibrações Livres não Amortecidas	24
2.2.2 Considerações Adicionais: Amortecimento e Frequências de Excitação	25
2.3 SENSIBILIDADE HUMANA: VIBRAÇÕES E RUÍDOS	26
2.4 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS: CONTROLE ACÚSTICO E DE VIBRAÇÕES	28
2.4.1 NBR 15575/2013: Norma de Desempenho de Edificações.....	30
2.5 MEDIDAS MITIGADORAS DE RUÍDOS DE IMPACTO	31
2.5.1 Controle de Transmissão de Vibração	31
2.5.2 Pisos Flutuantes	33
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 MATERIAIS	36
3.1.1 Mantas de SBR Expandido.....	36
3.1.2 Manta Pré-Fabricada de Grânulos de Pneus Reciclados Aglomerados com Poliuretano	38

3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
3.2.1	Preparação da Amostra	41
3.2.2	Metodologia do Ensaio	42
4	RESULTADOS	43
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	46
5.1	RIGIDEZ DINÂMICA E DESEMPENHO ACÚSTICO: MANTA SOUND SOFT	46
5.2	RIGIDEZ DINÂMICA E DESEMPENHO ACÚSTICO: MANTAS DE SBR	47
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

INTRODUÇÃO

Evolução da tecnologia dos materiais nos apresenta elementos estruturais cada vez mais esbeltos. Como resultado disso vê-se o uso crescente de concretos de alto desempenho que possibilitam a construção de vãos cada vez mais longos nas lajes e vigas de edifícios.

Não há como negar as benesses deste avanço tecnológico, contudo a diminuição da rigidez das edificações tem como resultado estruturas cada vez mais suscetíveis a vibrações. Estruturas de baixa rigidez além de problemas de vibrações apresentam maiores deformações, maiores problemas com ruídos, ou seja, maior suscetibilidade a carregamentos dinâmicos.

Embora as vibrações não incorram, normalmente, em problemas de ruína a sensibilidade humana a vibração e ao ruído não pode ser descartada.

Perceptivelmente a exposição ao ruído é uma condição estressante. E segundo Bistafa (2006), os principais efeitos temporários em decorrência da exposição ao ruído são: sobressaltos, tensões musculares, alterações dos padrões respiratórios e cardíacos.

É importante, portanto, considerar o conforto dos ocupantes e conseqüentemente o controle da propagação de ruído.

A preocupação com o controle de ruídos nas edificações tornou-se mais relevante desde 2013, ano de estreia da NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais: Desempenho. Embora a problemática do ruído não seja novidade a norma de desempenho como o próprio nome diz instituiu requisitos mínimos de desempenho para salvaguardar a integridade tanto das edificações como dos usuários e ocupantes das mesmas.

Ao tratar de ruído em edificações é importante distinguir a causa e fonte dos ruídos. Os ruídos ligados a questões de rigidez da estrutura são ruídos ditos de impacto e estão associados a atividades corriqueiras, por exemplo o caminhar.

Assim, se o ruído está associado a questões estruturais então é possível dizer que o desempenho acústico das edificações se tornou fator limitante para o projeto estrutural?

A resposta para esta pergunta é complexa. E sugere outra pergunta: Seria um retrocesso aumentar a rigidez dos elementos estruturais para garantir o desempenho acústico? Não. Uma edificação precisa ser um conjunto eficiente e todos os sistemas componentes devem trabalhar para que o desempenho de cada sistema seja máximo. Desta forma o conjunto apresentará também máxima eficiência.

Dentro do universo de controle de ruído de impacto há soluções que sugerem a adoção de materiais resilientes em sistemas de pisos. E é neste cenário que entram os pisos

flutuantes. Os pisos flutuantes são elementos construtivos que visam reduzir o impacto das atividades sobre as lajes.

Os pisos flutuantes utilizam-se de materiais resilientes, como lã de vidro, mantas de polímeros reciclados, mantas de pneus reciclados, isopor de alta densidade e mantas de polietileno, para desconectar a laje e a camada de piso propriamente dita. Embora o mercado apresente soluções viáveis para as camadas resilientes dos sistemas de piso flutuantes a busca por novos materiais e tecnologia é sempre justificável.

No âmbito deste trabalho além da preocupação com o desempenho acústico do sistema de pisos flutuantes há também preocupação ambiental. É impossível a engenharia de hoje deixar de lado a ideia de sustentabilidade. Neste contexto entram o estudo de materiais frutos de reutilização.

Os materiais poliméricos possuem origem nobre e são conhecidamente resilientes. A proposta de estudar as propriedades elásticas de um novo material se justifica pelo ganho ambiental atrelado ao aproveitamento de resíduos da indústria calçadista como matéria-prima para material de construção. Bem como sobre o conhecimento adquirido sobre o material em questão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

- Caracterizar a rigidez dinâmica de mantas de resíduo de borracha, copolímero de estireno-butadieno (SBR) expandido, e relacionar os resultados obtidos com a capacidade de isolamento acústico a ruído de impacto.

- Caracterizar a rigidez dinâmica de uma amostra de manta pré-fabricada de grânulos de pneus reciclados aglomerados com poliuretano e comparar os resultados com os valores comerciais do produto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar o ensaio de Determinação da Rigidez Dinâmica Aparente segundo os parâmetros da Norma ISO 9052-1:1989 em seis materiais utilizados como camada resiliente em pisos flutuantes em edificações;
- Comparar as características elásticas do material à capacidade de isolamento para ruído de impacto.
- Discutir os resultados dos ensaios sob a luz da Norma de Desempenho (NBR 15.575:2013 - Edificações Habitacionais - Desempenho)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ACÚSTICA

2.1.1 Som e Ruído

Os conceitos som, silêncio e ruído são quase tão antigos quanto a humanidade. Filosoficamente estes conceitos estão tão atrelados que pode-se dizer que “o som se opõe ao silêncio que se opõe ao ruído (...) E como cada um se opõe aos outros dois e todos se opõem, entre si, a todos, não há como pensar um deles, isoladamente do outro”. (Vogt, 2013). O relacionamento entre as variáveis componentes do som faz parte do ramo da física chamado acústica. De acordo com Kinsler et al (2000) pode-se definir acústica como uma ciência que estuda a geração, transmissão e recepção de energia sob a forma de ondas vibratórias.

Dentre os fenômenos acústicos tem-se o som como o mais relevante. O som é um movimento ondulatório mecânico “resultado das vibrações dos corpos elásticos, quando essas vibrações se verificam em determinados limites de frequência.” (COSTA, 2003, p. 1). O som indesejável é denominado ruído. Tem-se portanto, ruído como algo subjetivo já que este depende da sensibilidade humana. Por ser o ruído fruto da subjetividade, nos estudos sobre acústica realizados neste trabalho as propriedades válidas para som são válidas também para ruídos.

O som entendido como resultado de vibração pode apresentar-se em diferentes faixas de frequência. Para este estudo há interesse no som audível, ou seja, detectável pelo ouvido humano. Segundo Kinsler et al (2000), “Uma perturbação vibracional é interpretada como o som se sua frequência encontra-se no intervalo de cerca de 20 Hz a 20.000 Hz.”

2.1.2 Conceitos Fundamentais do Som

Ao tratar sobre desempenho acústico e som é conveniente conceituar as principais variáveis dos estudos sobre acústica. Entre essas variáveis pode-se citar a pressão sonora, impedância característica, intensidade e potência sonora.

Pressão Sonora

Segundo Bistafa (2006) “O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo.” (BISTAFA, 2006, p. 6). Quando a variação da pressão ambiente ocorre com certa taxa de oscilação no limiar audível o sistema auditivo humano capta o som. A esta variação da pressão ambiente chamamos pressão sonora.

Impedância Característica

A medida da impedância está relacionada a velocidade de propagação do som. E segundo Long (2006) refere-se a resistência ao movimento em dado ponto. Tal grandeza é expressa pela razão entre a pressão sonora e a velocidade das partículas.

Segundo Pedroso (2007) a velocidade de propagação da onda sonora tem relação direta com a ligação das moléculas constituintes do material: “Quanto mais rígida for esta ligação maior será a velocidade de propagação da onda sonora” (PEDROSO, 2007, p. 27)

A tabela 1 apresenta a velocidade de propagação das ondas de vibração para materiais normalmente utilizados na construção civil:

Tabela 1: Velocidade de Propagação das Ondas de Vibração

Meio Material	Velocidade (m/s)
Aço	6100,00
Concreto	3100,00
Madeira	3500,00
Água	1481,00
Ar	340,00

Fonte - Kinsler¹ (1973, apud Ferraz 2008)

¹ KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of Acoustic**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1982.480p.

Intensidade e Potência Sonora

Segundo Bistafa (2006) a intensidade sonora é uma grandeza vetorial e segundo Long (2006) pode ser definida como a quantidade média de energia propagada através de uma determinada área em determinado intervalo de tempo.

Já a potência sonora é a quantidade de energia gerada por uma fonte sonora em determinado intervalo de tempo.

Resumidamente tem-se que uma fonte sonora emite determinada potência sonora que altera a pressão ambiente em um ponto determinado de um recinto resultando em certa pressão sonora. A velocidade com que a alteração da pressão será percebida está relacionada com a impedância do meio onde a onda sonora será propagada. Por fim “a intensidade sonora é um indicador da magnitude, direção e sentido de propagação da energia sonora.” (BISTAFA, 2006, p. 14)

2.1.3 Tipos de Ruído

Os ruídos podem ser classificados de diferentes maneiras em conformidade com o interesse ao qual deseja-se estudar.

Segundo Silva² (1997, p.20 apud Santos 2013 p.12 e 13) quanto à variação da onda sonora no tempo o ruído classifica-se em:

- Contínuo – aquele no qual a variação é pequena e pode ser desprezada no intervalo estudado
- Ruído Intermitente – apresenta patamares de variação no intervalo de tempo estudado.
- De fundo – qualquer ruído que não seja proveniente do objeto da medição. Pode apresentar-se com variação flutuante/aleatória. O ruído de fundo é um elemento importante ao se lidar com acelerômetros e materiais de medição de ruído visto que ele pode influenciar e resultar em falsos positivos durante ensaios de captação de ruído e vibração.
- Impulsivo – explosões acústicas. Picos de ruídos em pequeno espaço de tempo.

² SILVA, P. Acústica arquitetônica e condicionamento de ar. Belo Horizonte: EDTAL 1997. 277p

Na figura 01 é possível observar as características do sinal sonoro emitido por cada tipo de ruído.

Figura 1: Tipos de Ruído

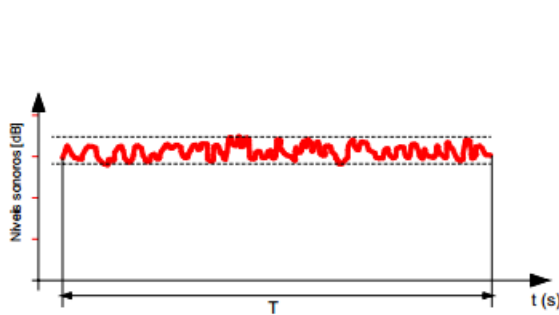


Fig. 1 a) Ruído Contínuo

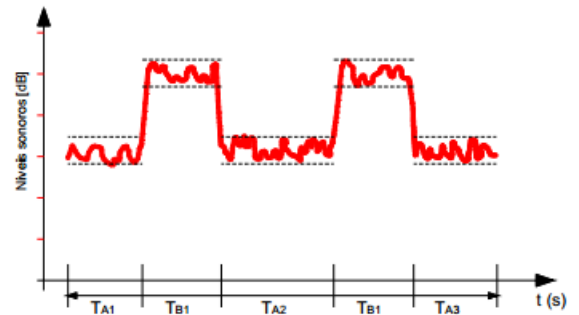


Fig. 1 b) Ruído Intermitente

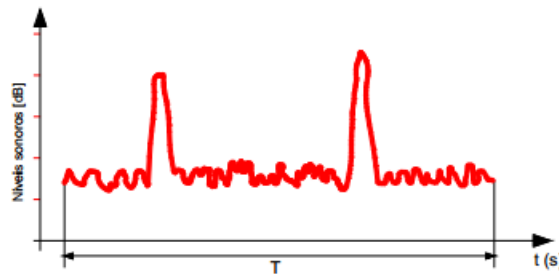


Fig. 1 c) Ruído Impulsivo

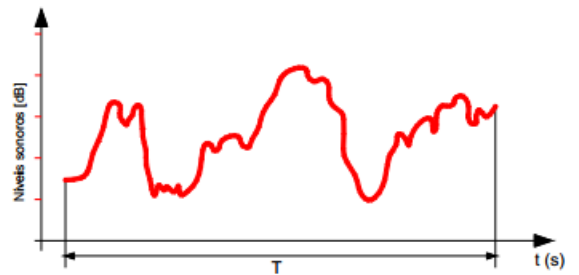


Fig. 1 d) Ruído Flutuante aleatório

Fonte: Mateus, 2008

Na figura 01 o eixo das ordenadas representa o nível sonoro do sinal e as abcissas o tempo.

Os ruídos também podem ser classificados de acordo com a forma de propagação do som. Nesta classificação tem-se os ruídos aéreos e os ruídos de impacto. O último é o objeto de estudo deste trabalho.

Para a Norma de desempenho de edificações (ABNT, 2013) o ruído aéreo é aquele cujo som é produzido e propagado através do ar enquanto que o ruído de impacto é fruto da vibração de corpos sólidos com transmissão em meio sólido e aéreo.

2.1.4 Ruído de Impacto

O ruído de impacto pode ser encarado como um ruído de fundo estrutural visto que a queda de um martelo ou o simples caminhar humano em um painel de laje são facilmente propagáveis ao longo da estrutura. A resposta desta propagação é a seguinte: o sinal sonoro gerado é sentido a grandes distâncias do ponto de origem do mesmo.

Do ponto de vista da duração do sinal sonoro o ruído de impacto pode ser encarado como um ruído impulsivo – picos elevados e de curta duração.

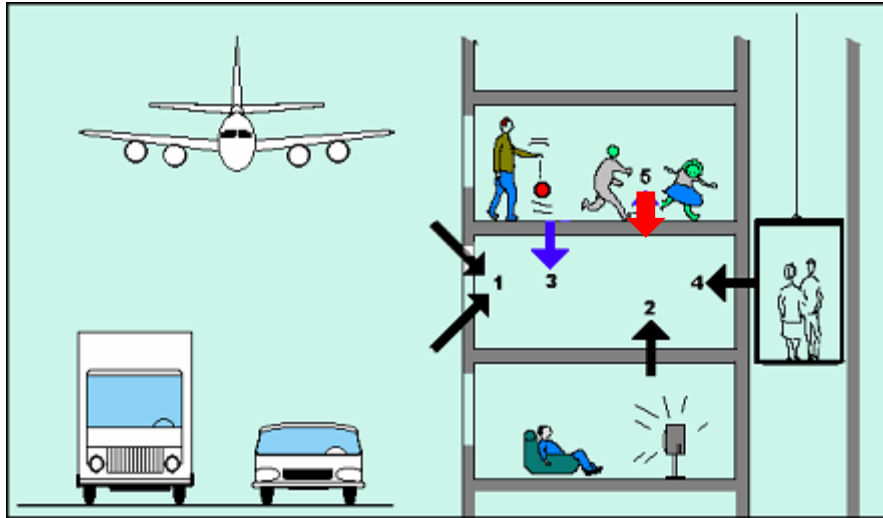
Segundo Long (2006) as vibrações, em academias, induzidas por impacto podem ser percebidas lateralmente a 30 metros de distância do ponto de origem enquanto que verticalmente a vibração da mesma fonte pode ser percebida a até 10 pavimentos do ponto de geração.

Um fator importante sobre a propagação e transmissão do ruído de impacto é a velocidade de propagação do som nos meios sólidos. Através dos dados da tabela 01 pode-se perceber que o som se propaga aproximadamente 10 vezes mais rápido através do concreto do que por meio do ar.

Sobre o ruído de impacto há de se considerar ainda a alta faixa de frequências excitáveis em decorrência deste tipo de vibração. Pedroso (2007) afirma que embora a duração do sinal sonoro apresente curta duração as amplitudes alcançadas e a quantidade de energia são elevadas.

As fontes geradoras de ruído de impacto são variadas. O caminhar humano, bem como outras atividades como correr ou pular, podem ser citados como uma das fontes geradoras de ruído de impacto em lajes de edifícios residenciais/comerciais. A vibração em decorrência do tráfego ou do funcionamento de máquinas, a exemplo lavadoras, também são bons exemplos da geração de ruído de impacto. A figura 02 demonstra alguns exemplos de fontes geradoras de ruído de impacto. Dentre os exemplos apresentados tem-se o caminhar e a queda de objetos, fontes 3 e 5 da figura 02, como objetos de interesse no estudo deste trabalho.

Figura 2: Fontes Geradoras de Ruído de Impacto



Fonte: Google Imagens: <http://www.test-lab.eu/i/acoustic1.png>

2.2 RUÍDO DE IMPACTO: PRINCÍPIOS FÍSICOS

Os problemas de controle de ruídos de impacto são antes de tudo problemas de vibração, convém portanto apresentar as variáveis concernentes ao estudo de vibrações.

Usualmente as estruturas se encontram sob ações que “variam com o tempo (em magnitude, posição, direção e/ou sentido) e são classificadas como dinâmicas em caso de desenvolvimento de forças inerciais.” (SORIANO, 2014, p. 1). Segundo Clough & Penzien (2003), o termo dinâmica pode ser definido simplesmente como variável no tempo. Deste modo o carregamento dinâmico apresenta magnitude, direção e sentido que podem vir a variar temporalmente. Em consonância com a variação temporal do carregamento a estrutura apresenta como resposta esforços e deslocamentos variantes. Não há, portanto, uma solução única ao tratar com carregamentos dinâmicos.

Dentro da análise de estruturas há a necessidade de explicar o comportamento de um corpo físico complexo através de modelos estruturais. O modelo estrutural é utilizado para representar matematicamente a estrutura analisada e “incorpora todas as teorias e hipóteses elaboradas (...) em função das diversas solicitações.” (MARTHA, 2010, p. 3). As teorias e hipóteses levantadas são pautadas nas leis da mecânica clássica: estática e dinâmica.

Para descrever o comportamento dinâmico é necessário enunciar a equação de movimento. Através desta equação é possível estabelecer o deslocamento da estrutura em cada instante de tempo.

O princípio d'Alembert nos permite escrever a equação de equilíbrio de forças atuantes em sistemas dinâmicos tal qual as utilizadas na estática. Ao apropriar-se do princípio fundamental da dinâmica de Newton, Alembert propôs a seguinte equação:

$$m\ddot{\mathbf{u}} + c\dot{\mathbf{u}} + k\mathbf{u} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

Cujas variáveis são:

m = massa

c = Amortecimento

k = Coeficiente de rigidez

$\ddot{\mathbf{u}}$; $\dot{\mathbf{u}}$; \mathbf{u} = aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente

\mathbf{f} = forças aplicadas

Os valores de rigidez, massa e amortecimento podem tomar notação matricial de ordem enésima para estudos com graus de liberdade mais altos. O significado físico destas variáveis é apresentado a seguir.

Segundo Martha (2010) em sistemas estáticos o *coeficiente de rigidez* (k_{ij}) é numericamente igual a força que deve atuar na direção de D_i para manter a estrutura em equilíbrio quando é imposto um deslocamento unitário na direção D_j e as demais deslocabilidades são nulas. Para sistemas dinâmicos a ideia é a mesma com o acréscimo conceitual de que a força atuante é variável no tempo. A parcela $k\mathbf{u}$ faz referência as características elásticas do sistema.

Analogamente a rigidez, Segundo Soriano (2014) a interpretação física de um coeficiente m_{ij} de uma *matriz de massa* é numericamente igual a força de inércia necessária na direção D_i devido a uma aceleração unitária na direção D_j mantidos os demais graus com acelerações nulas.

Já sobre o amortecimento, comenta-se:

“O Amortecimento de uma estrutura submetida a vibração está associada a dissipação de energia mecânica do sistema, usualmente sob a forma de energia térmica. A energia dissipada equivale ao trabalho realizado pelas forças de amortecimento.” (MAHREHOLTZ e BACHMANN, 1995)

Em caso de vibrações livres o amortecimento resulta em um decaimento contínuo da amplitude.

A equação 1 é uma equação diferencial ordinária linear de segunda ordem e apresentará soluções diferenciadas de acordo com o tipo de estudo realizado. As considerações sobre carregamento e amortecimento refletem diretamente na equação de deslocamento solução do sistema considerado.

Como abordado anteriormente, o estudo de estruturas depende de modelos estruturais adotados. Segundo Soriano (2014)

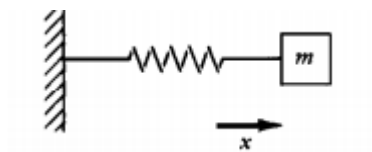
“Um modelo discreto é uma idealização em que a configuração geométrica de um sistema mecânico (em um instante qualquer) é especificada por um número finito de parâmetros cinematicamente independentes entre si, denominados graus de liberdade.” (SORIANO, 2014)

Os estudos realizados neste trabalho estão baseados em modelos discretos com apenas um grau de liberdade, ou seja, o fenômeno de vibração pode ser descrito em apenas uma coordenada.

2.2.1 Vibrações Livres não Amortecidas

Entre as considerações sobre o estudo de vibrações tem-se a vibração livre não amortecida como o caso mais simples.

Figura 3: Vibração Livre Não Amortecida



Fonte: (KINSLER et al, 2000)

A solução da equação 1 para a vibração livre não amortecida pode ser expressa por:

$$u(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (2)$$

Cujas variáveis são:

A= amplitude máxima do movimento

ω_0 = Frequência natural angular

A frequência natural de vibração é uma característica dos sistemas oscilatórios submetidos a vibração livre não amortecida representada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

A frequência natural de vibração tem-se um período associado expresso por:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$

O período (T) é intervalo temporal que uma onda vibratória leva para completar um ciclo. A frequência (f) representa a taxa de repetição do movimento, ou seja, o número de ciclos por unidade de tempo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

Através do estudo das vibrações livres não amortecidas é possível observar que a frequência natural de vibração é uma característica intrínseca da estrutura, portanto própria, que depende exclusivamente das características elásticas – coeficiente de rigidez – e da massa do sistema.

2.2.2 Considerações Adicionais: Amortecimento e Frequências de Excitação

Quando uma estrutura está submetida a carregamento dinâmicos além da frequência natural há de se considerar as frequências (ω) frutos do carregamento. A relação entre a frequência do carregamento e a frequência natural fornece a razão de frequência (r):

$$r = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (6)$$

A frequência tem uma amplitude/deslocamento associada a ela. Segundo Soriano (2014) a razão entre o deslocamento amplificado e a resposta natural da estrutura define o fator de amplificação dinâmica. (SORIANO, 2014). Que para sistemas não amortecidos apresenta a seguinte formulação:

$$Ad = \frac{1}{1-r^2} \quad (7)$$

Através da equação 7 é possível observar que o fator de amplificação dinâmica (Ad)

“cresce indefinidamente à medida que r se aproxima da unidade. Isto é, a amplitude tende ao infinito à medida que a frequência forçante se aproxima da frequência natural”. (SORIANO, 2014)

A esse aumento das amplitudes há de se ter atenção, visto que ele caracteriza a ressonância.

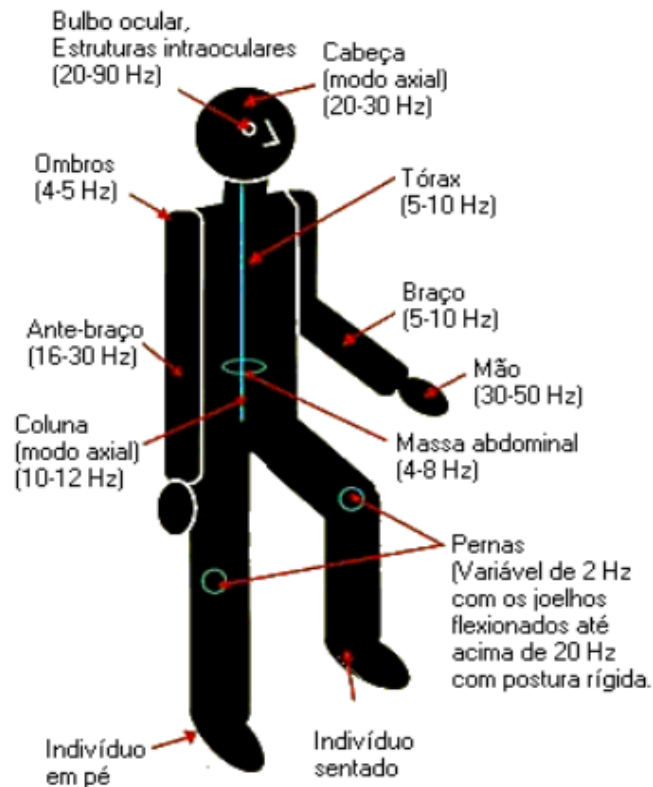
“Quando a frequência da força de excitação coincide com uma das frequências naturais não amortecidas do sistema a resposta, ou amplitude, do movimento aumenta progressivamente com um mínimo de excitação imposta” (Diógenes, 2010, p.42).

Como os problemas de ruídos são fenômenos sonoros e portanto de vibrações o estado de ressonância é um sério problema para o desempenho acústico das edificações.

2.3 SENSIBILIDADE HUMANA: VIBRAÇÕES E RUÍDOS

A sensibilidade humana à vibração depende da frequência da vibração e de como a mesma é percebida pelo corpo: através dos pés, das mãos, para um corpo sentado, deitado ou de pé. Tal diferença de percepção se dá pela heterogeneidade do ser humano. A figura 4 apresenta as principais frequências do nosso corpo.

Figura 4: Frequências de Ressonância do Corpo Humano



Fonte: (ANFLOR, 2003)

Além da frequência a duração da exposição a vibração também é um fator importante para o desenvolvimento de doenças, principalmente aquelas associadas ao estresse.

Segundo Vendrame (2016), os principais efeitos da vibração no organismo são:

- Perda de equilíbrio;
- Falta de concentração;
- Visão turva;
- Problemas gastrointestinais;
- Degeneração do tecido muscular e nervoso.

De forma análoga o corpo humano também apresenta diferentes níveis de sensibilidade ao som a depender do nível de concentração e interesse na ideia transmitida. A tabela 02 apresenta alguns exemplos dos níveis sonoros de atividades cotidianas.

Pode-se perceber que a exposição a eventos musicais está classificada como intensidade barulhenta e portanto insalubre, mas para um músico a exposição constante a tal intensidade sonora é agradável, mesmo que não seja exatamente saudável.

Tabela 2: Pressão Sonora e Sensação Subjetiva

Sensação Subjetiva	Descrição	Pressão Sonora (Pa)	Nível de Pressão Sonora (dB)
Estrondoso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perigo de Ruptura do Tímpano: avião a jato a 1,0m ▪ Limiar da dor: avião a jato a 5,0m 	200	140
Muito Barulhento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limiar do desconforto auditivo: proximidade de uma britadeira 	2-20	100-120
Barulhento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ambientes insalubres (com dB acima de 85): rua ou escritório ▪ Eventos musicais 	0,2-0,63	80-90
Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rádio com Volume médio ou pessoa falando a 1,0m de distância 	0,02-0,63	60-70
Tranquilo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sala de aula ideal 	0,002-0,006	40-50
Silencioso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teatro vazio 	0,00002-0,00006	20-30
Muito silencioso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limiar da audibilidade (gera desconforto): câmara anecóica 	0,00002-0,00006	0-10

Fonte: adaptada de (BISTAFA, 2006)

2.4 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS: CONTROLE ACÚSTICO E DE VIBRAÇÕES

Os problemas de vibração embora comuns dificilmente caracterizam problemas de ruína. As normas brasileiras caracterizam o estudo de vibrações como um estado limite de serviço, ou seja, a análise de vibração recai também sobre condições de conforto.

A NBR 8800:2008, Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios (ABNT, 2008), apresenta um anexo sobre vibrações em pisos. Segundo

a NBR citada as frequências naturais dos pisos não podem ser inferiores a 3Hz. Para pisos de edifícios comerciais ou residenciais em que há caminhar regular de pessoas a menor frequência natural do piso não pode ser inferior à 4Hz

A Norma brasileira 6118: 2014, Projeto de Estruturas de Concreto: procedimentos, (ABNT, 2014) apresenta como restrição a ressonância que a razão de frequência entre a frequência natural e a frequência crítica deve ser no mínimo, 1,2, ou seja:

$$\frac{f_0}{f_{crit}} > 1,2$$

A NBR 6118 indica que as frequências limite superior da faixa para estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas, na falta de dados experimentais, podem ser descritas conforme o tabela 3:

Tabela 3: Frequências Limites Superior estruturas submetidas a vibrações por indução humana

Caso	Frequência Limite (Hz)	Frequência Natural Mínima (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,00	9,6
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,00	8,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,50	5,4
Escritórios	4,00	4,8
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,50	4,2

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014)

Os limites estabelecidos pelas normas de estruturas de concreto e aço visam assegurar o desempenho das estruturas quanto ao controle de vibrações evitando estados de ressonância. Tal situação objetiva, acima de tudo, assegurar o conforto e uso das edificações.

Embora não seja o foco principal deste trabalho a percepção de vibração, abordado no item 2.3, resulta em desconforto para os usuários das edificações. Certos níveis de vibração, que devem ser evitados, além de acarretar problemas de saúde por exposição prolongada podem conduzir a danos materiais em máquinas, equipamentos e mobiliários.

2.4.1 NBR 15575/2013: Norma de Desempenho de Edificações

A parte 1 da NBR 15575 define os requisitos, critérios e generalidades para o desempenho das edificações. Segundo a NBR referida (ABNT, 2013) as edificações devem apresentar desempenho acústico adequado tanto no que se refere a ruídos aéreos exteriores como isolamento adequado entre as áreas comuns e privativas. O item 12 da referida norma faz distinção entre os requisitos de níveis de isolamento e desempenho para as vedações externas (fachadas), ao ruído aéreo entre pisos e paredes e aos ruídos de impacto, sendo o último destes o objeto de estudo deste trabalho.

A norma brasileira de desempenho de edificações na parte terceira institui o desempenho requerido pelos sistemas de pisos de edificações quanto ao ruído de impacto de acordo com os dados do tabela 04.

Tabela 4: Critério e nível de Pressão sonora de impacto padrão ponderado, $L'nT,w$

Elemento	$L'nT,w$ (db)	Nível de Desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior
Sistema de piso de áreas de usos coletivo sobre unidades habitacionais autônomas	51 a 55	Mínimo
	46 a 50	Intermediário
	≤ 45	Superior

Fonte : Norma de desempenho 15575-3 ABNT (2013)

O nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'nT,W$) é “ uma medida da capacidade da laje de transmitir sons de impacto.” (BISTAFA, 2006, p. 288)

O valor de $L'nT,w$, depende de vários fatores: Rigidez da laje, ou seja do produto entre o módulo de elasticidade e momento de inércia, forma de vinculação dos bordos da laje, comprimento dos vãos e forma de vinculação das paredes.

A norma de desempenho recomenda a avaliação do desempenho acústico das edificações para ruído de impacto através de método de engenharia, ISO 140-7, ou através do

método simplificado de campo, ISO 10052. Embora a norma afirme existir maior precisão no método de engenharia os resultados do método de campo são aceitos sem restrições.

As medições dos valores de $L'_{nT,w}$ devem ser executadas com portas e janelas fechadas, tais como as edificações serão entregues pela empresa construtora ou incorporadora. E devem considerar o sistema de piso também conforme entregue pela empresa construtora.

Para casos de sistemas de piso em desacordo com o que preconiza a norma de desempenho será de responsabilidade das empresas construtoras/incorporadoras fazer uso de tecnologias construtivas que reduzam os efeitos do impacto, ou vibrações, sobre as lajes com consequente melhoria do desempenho acústico do sistema de piso.

2.5 MEDIDAS MITIGADORAS DE RUÍDOS DE IMPACTO

2.5.1 Controle de Transmissão de Vibração

O estado de ressonância amplifica as respostas a vibrações da estrutura. A solução para tanto consiste em afastar a frequência de excitação da frequência natural da estrutura.

A frequência de excitação normalmente não pode ser alterada a não ser que seja alterado o uso da estrutura ou que incorra medidas de isolamento da vibração.

O caminhar humano, um exemplo de frequência de excitação em pisos, pode ser descrito por diferentes modelos biodinâmicos, mas a frequência do passo é da ordem de 2,0Hz. As frequências naturais dos pisos devem, portanto, ser maiores que 3,0Hz, por norma, afim de evitar o fenômeno de ressonância e consequentemente a amplificação das vibrações em decorrência deste fenômeno.

Afim de atender os requisitos normativos e evitar os efeitos de ressonância, deve-se, portanto, considerar formas de isolamento das vibrações na estrutura.

Ao tratar de isolamento de vibrações entra em cena o conceito de transmissibilidade. A transmissibilidade (Tr) é a razão entre a força transmitida à base do sistema a isolar e o carregamento do sistema.

O problema de isolamento de vibração é idêntico tanto para isolar a base da força aplicada pelo sistema, quanto para isolar o sistema do movimento ocorrido na base.

O Tr é expresso através da equação 8:

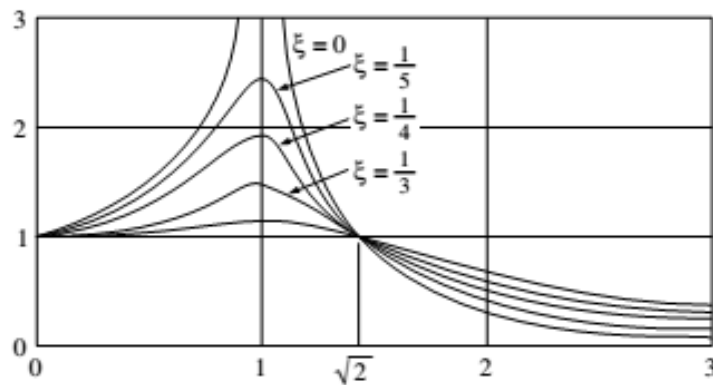
$$Tr = \frac{\sqrt{1 + 4\varepsilon^2 r^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + 4\varepsilon^2 r^2}} \quad (8)$$

Cujas variáveis são:

ε – razão de amortecimento

r – razão de frequências

Figura 5: Gráfico da Transmissibilidade em função da razão de Frequências



Fonte:(CLOUGH E PENZIEN, 2003)

A partir do gráfico da figura 5 é possível perceber que para razões de frequências inferiores à raiz de 2 a força transmitida à base é amplificada. Observa-se ainda que a amplificação é inversa ao amortecimento.

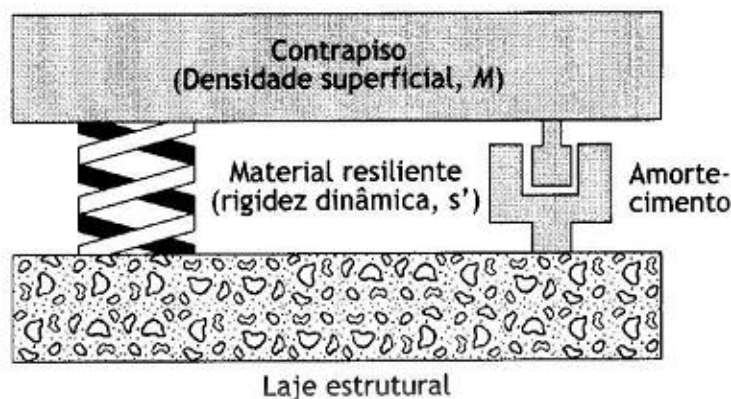
É importante considerar a transmissibilidade ao fazer uso de medidas mitigadoras de impacto ou redutores de vibração, pois o efeito pode ser contrário ao desejado.

2.5.2 Pisos Flutuantes

O desempenho acústico de um sistema de piso depende de todos os elementos constituintes: laje, contra piso e revestimento. O sistema de piso flutuante nada mais é do que um sistema de piso que faz uso de uma camada intermediária, de material resiliente, desconectando a laje da camada de contrapiso e revestimento. A separação do sistema permite que parte do impacto sofrido seja absorvido pela camada de material resiliente resultando assim em redução da força que chega à laje. Como resultado, considerando o mesmo impacto sofrido, a vibração de um sistema de piso com camada resiliente é menor do que aquele que apresenta apenas laje/contra piso/revestimento.

O funcionamento do piso flutuante pode ser aproximado a um modelo massa-mola onde o material resiliente faz vezes de mola e o contra piso representaria a massa.

Figura 6: Modelo Simplificado em um grau de liberdade do Sistema de Piso Flutuante



Fonte: Bistafa (2006)

O desejável para um sistema de piso flutuante é que o material resiliente absorva o máximo possível do impacto. Tal característica demanda coeficiente de rigidez baixo, ou seja, o mais flexível possível, o que poderia acarretar danos na camada de revestimento do sistema de piso.

O uso de pisos flutuantes deve estar atrelado à ponderação do nível de deformação aceitável para as camadas subsequentes do pavimento.

Segundo Pedroso (2007) a natureza e espessura da camada elástica pode resultar em um ganho de desempenho acústico relacionado ao aumento da espessura da camada resiliente.

Sabendo-se a rigidez dinâmica do sistema de piso é possível estimar o desempenho acústico de determinado material resiliente. Há primeiro de se determinar o nível de impacto normalizado da laje (L_n), sem material resiliente.

Segundo Bistafa (2006) tal parâmetro pode ser estimado através da equação 9, válida apenas para lajes de concreto pouco amortecidas e para frequências acima da crítica.

$$L_n = -30 \log(t) + \Delta L_{\text{banda}} + 54 \text{dB} \quad (9)$$

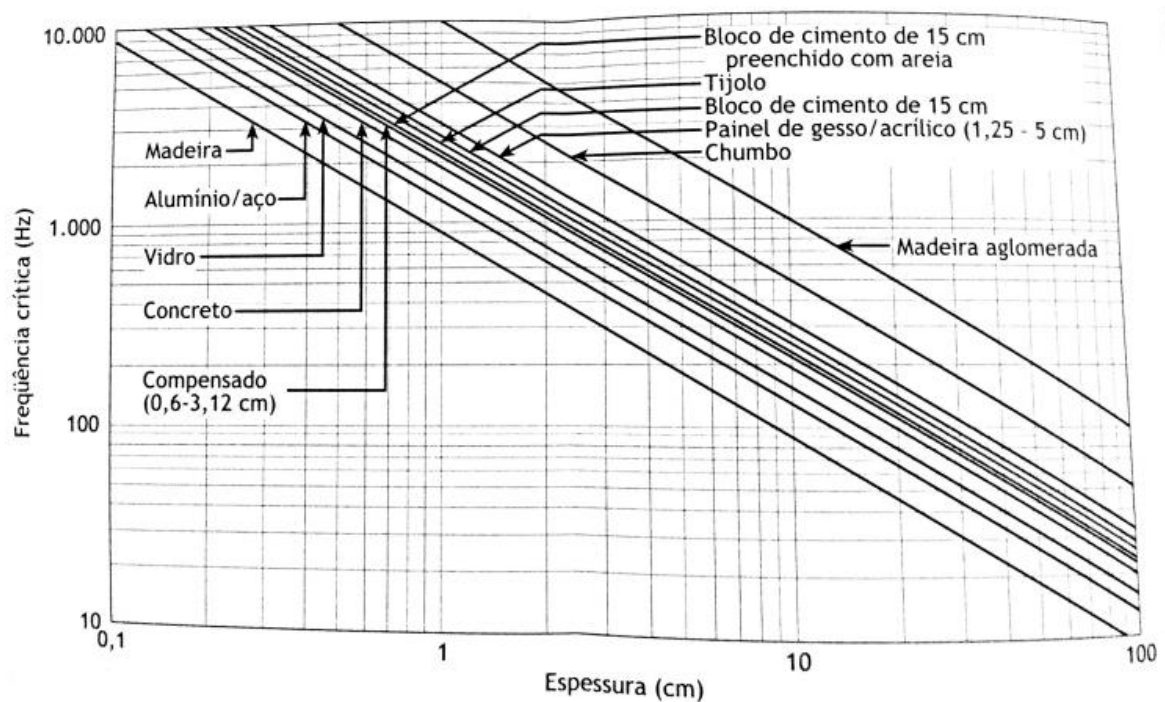
Onde

t = espessura da laje em metros

ΔL_{banda} = -1,5dB (para bandas de oitava e -6,5 para bandas de 1/3 de oitava).

A título de estimativa, a frequência crítica dos painéis pode ser determinada através do gráfico da figura 07.

Figura 7: Gráfico para Determinação da Frequência Crítica



Fonte: Bistafa (2006)

A redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_w), para reações localizadas, a exemplo o caminhar, pode ser expresso através da seguinte equação:

$$\Delta L_w = 40 \log \frac{f}{f_0} \quad (10)$$

Onde:

f_0 a frequência de ressonância do sistema de piso flutuante, em Hz e f é a frequência da banda de oitava em análise. A frequência de ressonância do sistema de piso flutuante é expressa por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m}} \quad (11)$$

Cujos termos são:

f_0 - Frequência de ressonância do sistema de piso flutuante

s' - rigidez dinâmica do isolador (material resiliente)

m – densidade superficial do contrapiso

Por fim, o L'_n ou seja, o nível sonoro do sistema de piso com uso de material resiliente é expresso por:

$$L'_n = L_n - \Delta L_w \quad (12)$$

Para frequências de excitação próximas à frequência de ressonância a redução do nível sonoro normalizado de impacto é muito baixa, e para frequências inferiores a de ressonância é negativa. Nestas situações, segundo Bistafa (2006) o piso se move em fase com a laje e o desempenho acústico do sistema é “menos favorável do que a laje nua”. (BISTAFA, 2006, p. 292). Tal comportamento pode ser explicado pelo fenômeno de amplificação dinâmica descrito anteriormente.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho deu-se em duas fases bem definidas. Na primeira fase foi desenvolvida uma pesquisa exploratória, de ordem bibliográfica, afim de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de pisos flutuantes e os requisitos básicos de desempenho acústico para pisos de edificações de usos residencial/comercial.

Posteriormente foram realizados ensaios para determinação da rigidez dinâmica aparente de materiais utilizados sob pisos flutuantes.

Os dados de rigidez obtidos foram utilizados para comparar a relação entre rigidez e desempenho acústico real das mantas de resíduo de borracha, copolímero de estireno-butadieno (SBR) obtido através de relatório técnico de ensaio de desempenho acústico.

Ao todo foram ensaiados 6 materiais, entre eles 05 mantas de SBR expandido fruto da reciclagem de material da indústria calçadista, não comercial, e 01 manta pré-fabricada de grânulos de pneus reciclados aglomerados com poliuretano, comercial.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Mantas de SBR Expandido

As mantas ensaiadas neste trabalho são fruto da reutilização de resíduos da indústria calçadista. Os materiais estão em fase de teste e não se encontram no mercado.

As mantas possuem espessuras, densidades e composição granulométrica variadas. Visualmente as mantas se apresentam coloridas o que mostra o uso de matrizes variadas no processo produtivo. A figura 08 apresenta a aparência das mantas ensaiadas.

Figura 8: Mantas de SBR

As características relativas ao desempenho acústico das mantas ensaiadas foram obtidas através de relatório técnico da SCIENTEC (2014) e podem ser observadas na tabela 01. Os valores de Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado ($L'_{nT,w}$) são valores médios.

Tabela 5: Desempenho Acústico de Mantas de SBR Expandido

Material	Espessura (mm)	Densidade (Kg/m ³)	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de Isolamento (dB)	Desempenho (NBR 15575-3)
Sistema Padrão			75	0	Mínimo
Sistema Amarelo	5	820	67	8	Mínimo
Sistema Verde	5	780	66	9	Mínimo
Sistema Multicolorido 7mm	7	600	66	9	Mínimo
Sistema Multicolorido 5m	5	600	66	9	Mínimo
Sistema Multicolorida 3mm	3	600	69	6	Mínimo

Fonte: Relatório Técnico da SCIENTEC (2014)

Segundo o relatório técnico do material o ensaio de desempenho ao ruído de impacto foi realizado conforme as indicações da Norma ISO 140-7:1998. As instalações da câmara acústica do ensaio apresentaram as seguintes características:

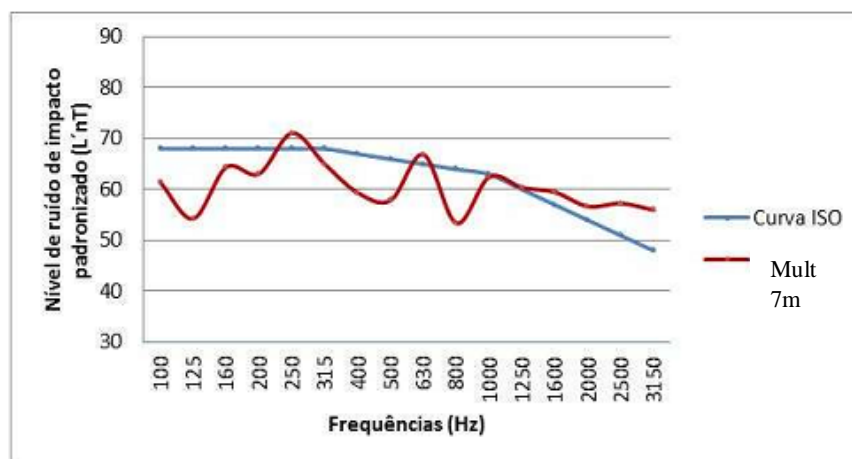
- Laje do tipo pré-moldada, com nervuras e blocos cerâmicos e espessura final de 13cm;

- Contra piso de argamassa no traço 1:4 (cimento: areia) com 4cm de espessura;
- Revestimento com placas cerâmicas de 34 cm x 34 cm (PEI 4), fixadas com argamassa colante tipo AC II e rejuntadas com cimento branco.

O sistema padrão faz referência ao sistema de piso comum enquanto os outros sistemas utilizaram-se de mantas de isolamento acústico.

O desempenho acústico considerado é um valor médio conforme especificações da norma ISO 140-7:1998. De acordo com o relatório técnico as mantas ensaiadas apresentaram variação de $L'_{nT,w}$ similar. A figura 9 apresenta a variação do Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado para um das mantas ensaiadas: **manta** multicolorida de 7mm.

Figura 9: Gráfico de $L'_{nT,w}$ em função da Frequência de Impacto para Manta de SBR



Fonte: Relatório Técnico da SCIENTEC (2014)

3.1.2 Manta Pré-Fabricada de Grânulos de Pneus Reciclados Aglomerados com Poliuretano

Foi utilizada 01 manta de grânulos de pneus reciclados. A manta ensaiada se encontra no mercado como uma alternativa para a melhoria do desempenho acústico de sistemas de pisos. O material ensaiado é da linha sound-soft contra pisos da empresa Aubicon. Por se tratar de um material com propriedades e desempenho conhecidos a manta Sound-Soft Contra piso 5-600 foi utilizada como amostra de referência.

As características da manta em questão, segundo relatórios técnicos fornecidos pela empresa são:

- **Espessura:** 5mm
- **Densidade:** 600 kg/m³
- **Rigidez dinâmica aparente:** 29 MN/m³
- **Frequência de Ressonância:** 59,10Hz
- **L'nT,w:** 49dB para laje em concreto armado e 58dB para laje protendida

A figura 10 apresenta uma amostra comercial do material em questão.

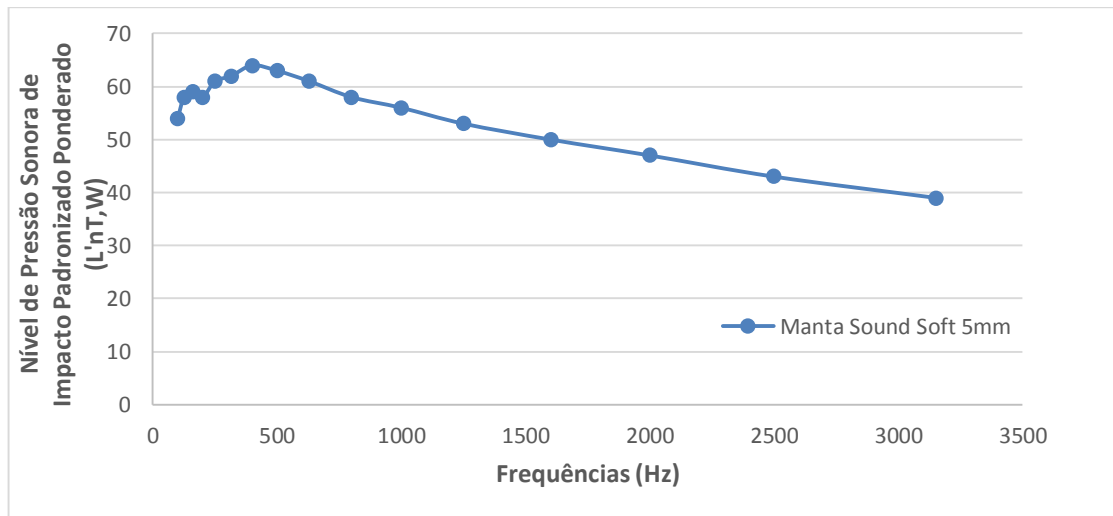
Figura 10: Amostra da Manta de Granulo de Pneu Reciclado



A manta em questão é considerada de alta capacidade de resiliência. Segundo dados da empresa fabricante a manta mantém o desempenho inalterado para cargas de até 2500Kg/m².

A figura 11 apresenta o comportamento da manta Aubicon para ensaio de desempenho acústico em lajes protendidas. O sistema padrão utilizado pela empresa não foi informado.

Figura 11: Gráfico de $L_{nT,w}$ em função da Frequencia de Impacto para Manta Sound Soft 5mm



Fonte: Relatório Comercial da Empresa Aubicon

O ensaio de desempenho acústico analisa o comportamento isolante de todo o sistema de piso, para as condições de ensaio. As empresas que realizaram os ensaios para os sistemas padrões, sem isolamento acústico, apresentam sistemas diferentes. A comparação dos materiais quanto ao isolamento fica portanto comprometida.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento deste trabalho consistiu na caracterização das propriedades elásticas de materiais utilizados como camada flexível em pisos flutuantes e comparação dos resultados obtidos com o desempenho acústico do sistema de piso.

Dentro deste contexto foram realizados ensaios de determinação da rigidez dinâmica aparente para materiais utilizados sob pisos flutuantes em edificações. Este procedimento está descrito na norma americana ISO 9052-1: 1989.

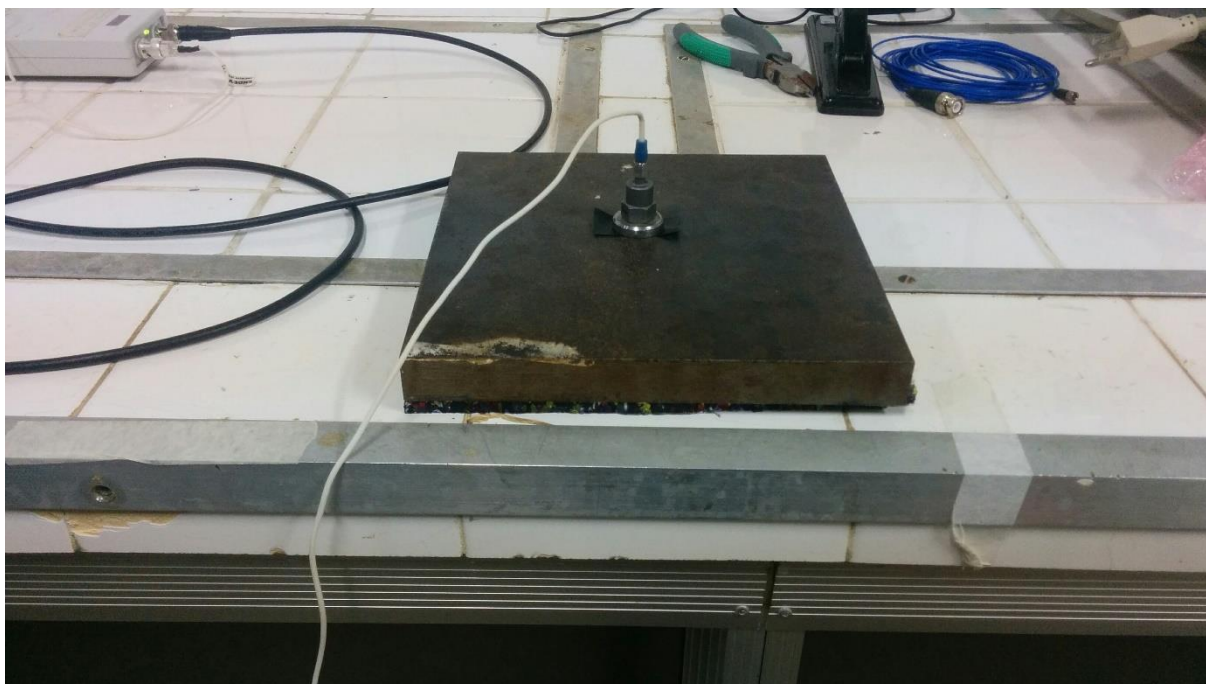
Segundo a ISO 9052-1: 1989 “Rigidez dinâmica é a razão entre a força dinâmica e o deslocamento dinâmico” (ISO, 1989)

O objetivo do ensaio é a determinação da rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra, s^{-1} , através do método de ressonância. Neste método a frequência ressonante, do sistema massa-mola de vibração vertical foi mensurada, a mola sendo a amostra do material resiliente sob teste e a massa sendo uma placa de carga.

No sistema dinâmico formado pelo conjunto foi analisada apenas a componente vertical do deslocamento, portanto o estudo do fenômeno de ressonância ocorrido é explicado pelas regras dos sistemas com um grau de liberdade abordadas na fundamentação teórica deste trabalho.

A figura 12 apresenta o esquema de ensaio adotado.

Figura 12: Esquema de Ensaio



3.2.1 Preparação da Amostra

De cada material a ensaiar foram retiradas três amostras normatizadas com as dimensões de 200mmx200mm. Por se tratar de material com face plana e regular não houve necessidade de nenhuma preparação adicional para as amostras.

As amostras foram então colocadas entre duas superfícies horizontais, a base (ou prato base) e a placa de carga, individualmente.

A placa utilizada é quadrada com dimensões $(200 \pm 3)\text{mm} \times (200 \pm 3)\text{mm}$, é feita de aço, com massa 6,56 kg. Como base utilizou-se a superfície plana do piso em local previamente definido. A base, portanto pôde ser considerada sem irregularidades.

3.2.2 Metodologia do Ensaio

O procedimento de ensaio adotado está preconizado na ISO 9052-1.

Após montagem do sistema, conforme figura 12, foi instalado no centro da placa de carga um acelerômetro. Utilizou-se o software Labview para visualizar os pulsos captados pelo acelerômetro. O software fornece um gráfico de amplitudes em função do tempo para cada amostra ensaiada.

Com o equipamento montado procedeu-se a calibração do conjunto: a primeira amostra ensaiada foi de material com propriedades conhecidas afim de comparar os resultados obtidos com os parâmetros conhecidos.

Por fim procedeu-se a excitação individual de cada amostra. A excitação foi realizada com marreta de borracha, por impacto.

Os dados de amplitude e tempo obtidos no ensaio possibilitaram plotar um gráfico no domínio da frequência no qual foi possível identificar o pico de frequência de cada amostra de material ensaiado.

Para cada material foram realizadas quatro medições da frequência de ressonância. Duas na primeira amostra e uma para cada amostra restante.

De posse dos dados de frequência foi possível calcular a rigidez dinâmica aparente das amostras a partir da equação 13, que nada mais é que a equação de ressonância explicitada para a rigidez:

$$s't = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2 \quad (13)$$

$s't$ – rigidez dinâmica por unidade de área da amostra

m'_t – densidade superficial da placa de carga

f_r – frequência de ressonância do sistema

Segundo a ISO 9052-1 a rigidez dinâmica do material resiliente será definida ainda por uma parcela da rigidez em resposta a resistividade do ar. Os ensaios realizados determinaram apenas a rigidez dinâmica das amostras.

4 RESULTADOS

Os dados coletados no ensaio de determinação da rigidez dinâmica aparente são os dados de frequência de ressonância do sistema massa-mola, modelo dinâmico suposto para representação do piso flutuante.

A sequência de figuras a seguir, figuras 13 à 17, apresentam o espectro de frequências das mantas de SBR ensaiadas. É mostrado apenas um espectro por material.

Figura 13: Espectro de Frequências Manta SBR - Verde

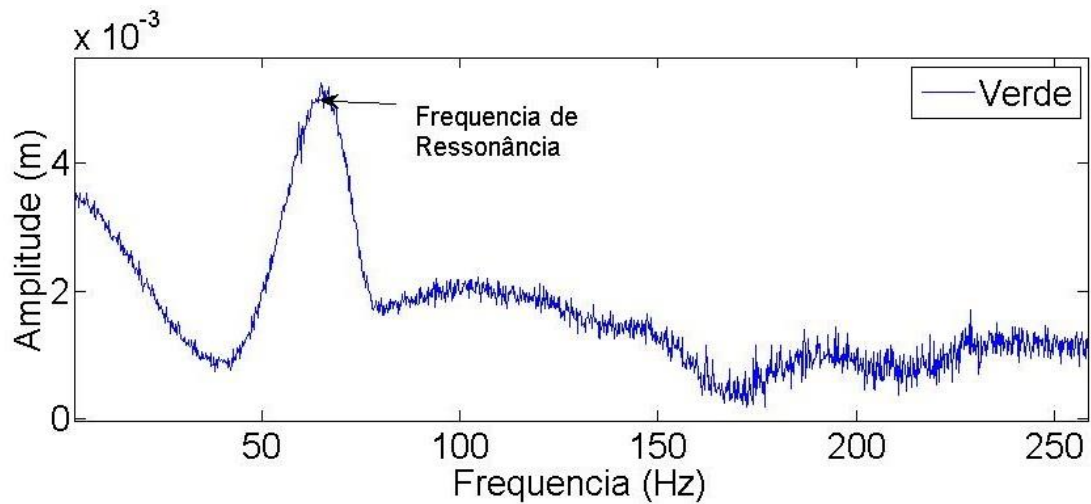


Figura 14: Espectro de Frequências Manta SBR - Amarela

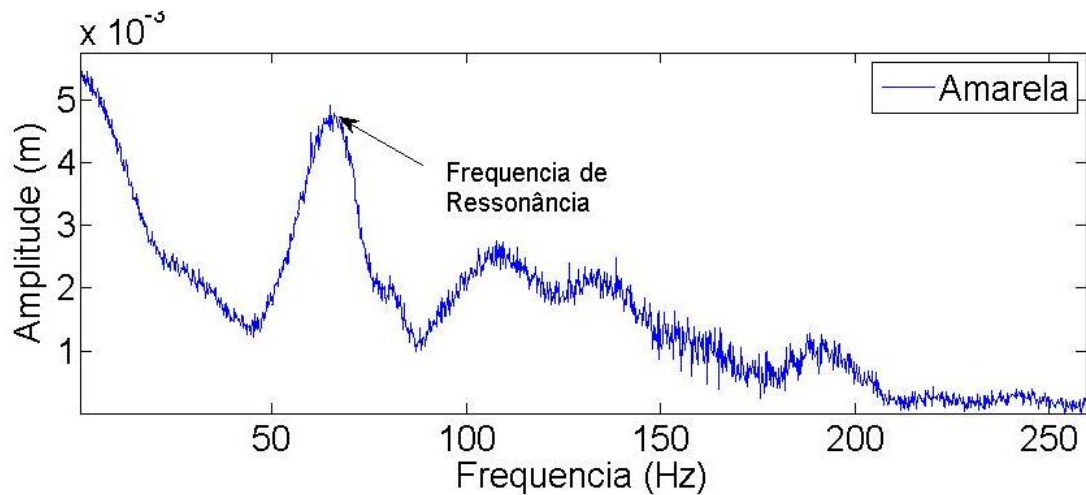


Figura 15: Espectro de Frequências Manta SBR - Multicolorida 5mm

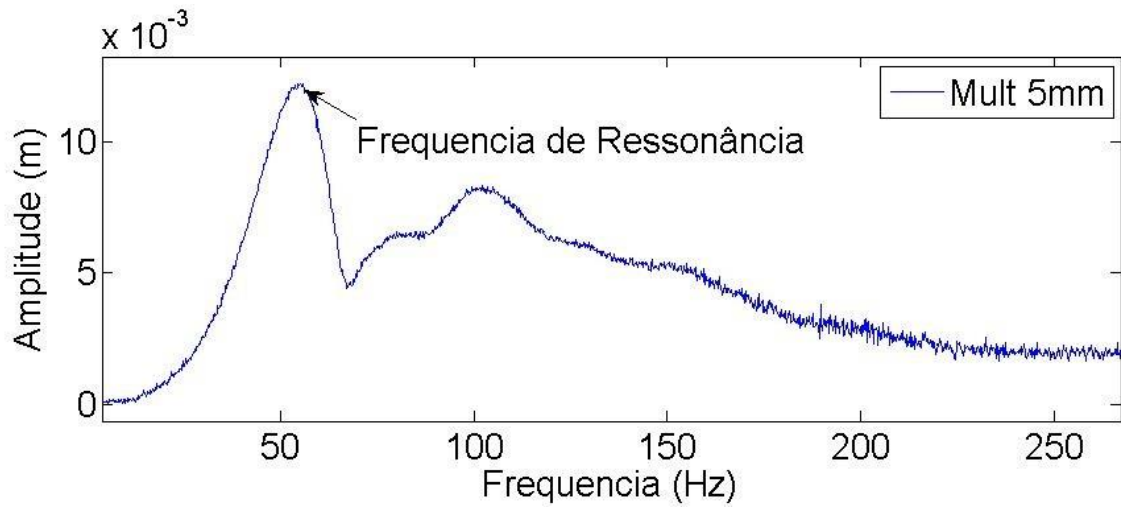


Figura 16: Espectro de Frequências Manta SBR Multicolorida 3mm

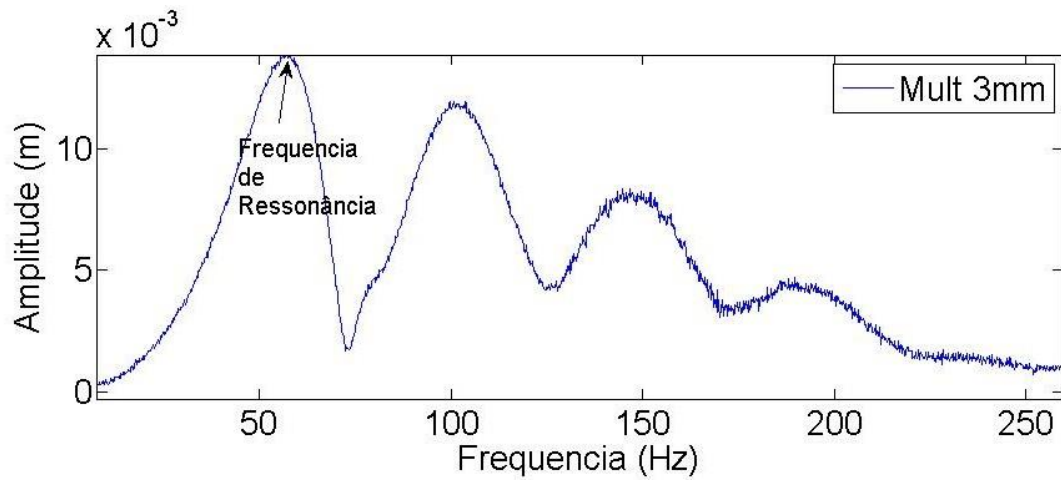
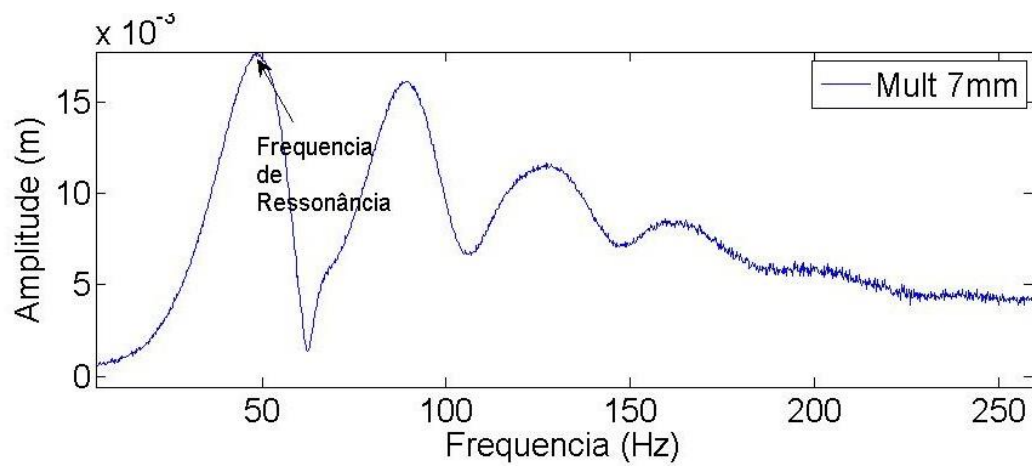


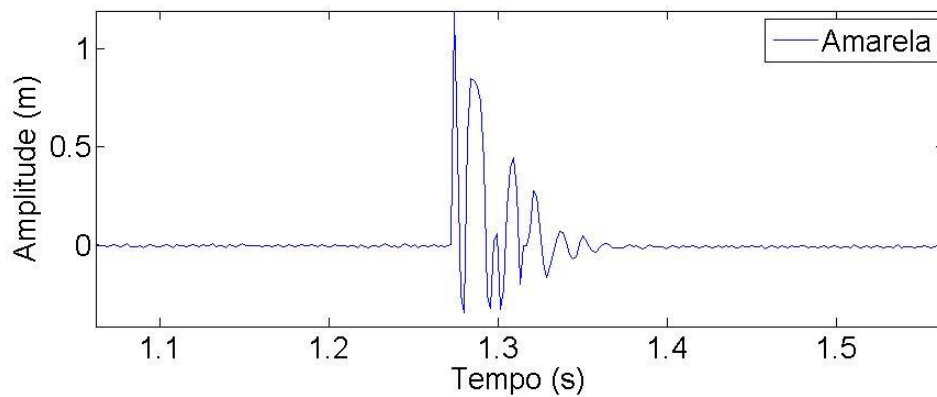
Figura 17: Espectro de Frequências Manta SBR - 7mm



A partir do gráfico de frequências é possível identificar a frequência de ressonância do sistema. Para a máxima amplitude obtida no ensaio está associada a frequência de ressonância do sistema estudado.

A figura 18 apresenta o decaimento da amplitude, em função do amortecimento do material, apresentado pela manta amarela de SBR.

Figura 18: Sinal em Domínio do Tempo Manta SBR - Amarela



Para cada material ensaiado foram obtidos quatro gráficos de frequência como os das figuras 13 à 17. Os dados das frequências coletados nos gráficos estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Frequências obtidas através do Ensaio de Rigidez dinâmica

Número da amostra	Frequências Obtidas em Ensaio para cada amostra (Hz)					
	Pneu	Amarela	Verde	Multicolorida 3mm	Multicolorida 5mm	Multicolorida 7mm
Amostra 1_1	56,42	-	63,63	56,82	55,62	49,82
Amostra 1_2	59,22	-	62,03	59,42	49,82	52,02
Amostra 2	53,42	62,83	65,03	57,22	48,22	48,82
Amostra 3	-	62,82	61,83	60,22	51,82	53,02
Frequência média (Hz)	56,35	62,83	63,13	58,42	51,37	50,92
Desvio Padrão	5,4%	0,01	1,50	1,66	3,19	1,94
Coefficiente de Variação	5,15%	0,02%	2,38%	2,84%	6,21%	3,81%

O dado da terceira amostra da manta de grânulos de pneu foi descartado. A amostra referida sofreu avarias durante o processo de preparação e apresentou um pequeno rasgo. Os dados da amostra 01 da manta amarela se mostraram inconclusivos. O espectro não apresentou pico de frequência detectável, portanto não foi possível obter dados.

Aplicando os dados de frequência média da tabela 06 na equação 13 foi possível determinar a rigidez dinâmica aparente por unidade de área para cada material ensaiado conforme observável na tabela 07.

Tabela 7: Rigidez Dinâmica Aparente dos Materiais Estudados

Material	Espessura (mm)	Densidade (Kg/m³)	Frequência (Hz)	Rigidez Dinâmica (MN/m³)
Pneu	5	600	56,35	20,56
Amarela	5	820	62,83	25,55
Verde	5	780	63,13	25,80
Multicolorida 7mm	7	600	50,92	16,79
Multicolorida 5mm	5	600	51,37	17,08
Multicolorida 3mm	3	600	58,42	22,10

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 RIGIDEZ DINÂMICA E DESEMPENHO ACÚSTICO: MANTA SOUND SOFT

Os resultados entre os valores do relatório técnico e os valores obtidos em ensaio para as mantas de grânulos de pneu apresentaram as seguintes diferenças:

Tabela 8: Rigidez Dinâmica obtida em ensaio x Valor Comercial – Manta Sound Soft 5mm

Parâmetro	Valores de Referência	Valores Obtidos em ensaio	Diferença
Rigidez dinâmica aparente (MN/m³)	29	20,56	29,10%

Os dados da tabela 09 apresentam as diferenças entre os parâmetros de ensaio.

Tabela 9: Diferenças entre as placas de carga de referência e de ensaio - manta Sound Soft 5mm

Parâmetro	Valores de Referência	Valores Obtidos em ensaio	Diferença
Frequência de Ressonância (Hz)	59,1	56,35	4,65%
Massa da Placa de Carga (Kg/m²)	208,8	164,00	21,46%

Segundo relatório técnico da empresa Albicon, com relação ao desempenho acústico a manta Sound Soft apresenta desempenho superior no enquadramento da norma 15575/2013 – Norma de Desempenho.

Com relação ao desempenho acústico expresso através do Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado ($L'_{nT,w}$) pode-se perceber que o uso da manta Sound Soft incorre numa melhoria de desempenho acústico de 19,44% - para o sistema padrão utilizado em ensaio.

Tabela 100: Melhoria no Desempenho Acústico - Sound Soft 5mm

	Semtratamento (dB)	Sound soft5 mm (dB)	Melhoria do Desempenho
$L'_{nT,w}$	72	58	19,44%

5.2 RIGIDEZ DINÂMICA E DESEMPENHO ACÚSTICO: MANTAS DE SBR

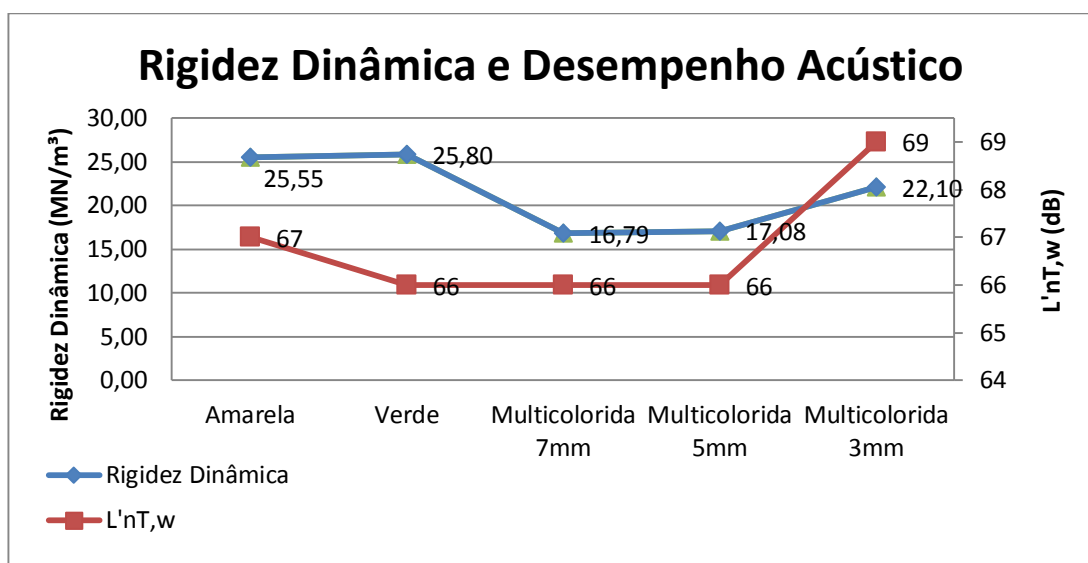
As mantas de SBR apresentam uma melhoria de desempenho acústico entre 8% e 12%. O ganho citado é considerado em relação ao sistema padrão utilizado em ensaio que apresenta desempenho sem tratamento de 75dB. A melhoria sofrida com a adoção das mantas de SBR não foi suficiente para mudar o enquadramento do sistema de piso na normatização da NBR 15575/2013-3. O desempenho do sistema continuou classificado como mínimo.

Tabela 111: Rigidez Dinâmica e Melhoria no Desempenho para Mantas de SBR

Material	Espessura (mm)	Densidade (Kg/m ³)	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	L'nT,w (dB)	Melhoria no Desempenho %
Sistema Verde-Amarelo	5	820	25,11	67	10,7%
Sistema Verde	5	780	25,80	66	12,0%
Sistema Multicolorido 7mm	7	600	16,79	66	12,0%
Sistema Multicolorido 5mm	5	600	17,08	66	12,0%
Sistema Multicolorida 3mm	3	600	22,10	69	8,0%

Com relação ao desempenho acústico e a densidade das mantas de SBR não foi possível observar diferenças sensíveis. O gráfico da figura 19 apresenta a relação entre a rigidez dinâmica e o desempenho acústico das mantas ensaiadas. Como os valores de desempenho apresentaram diferenças muito pequenas entre si não foi possível relacionar o desempenho obtido no teste acústico com a rigidez da camada resiliente de piso.

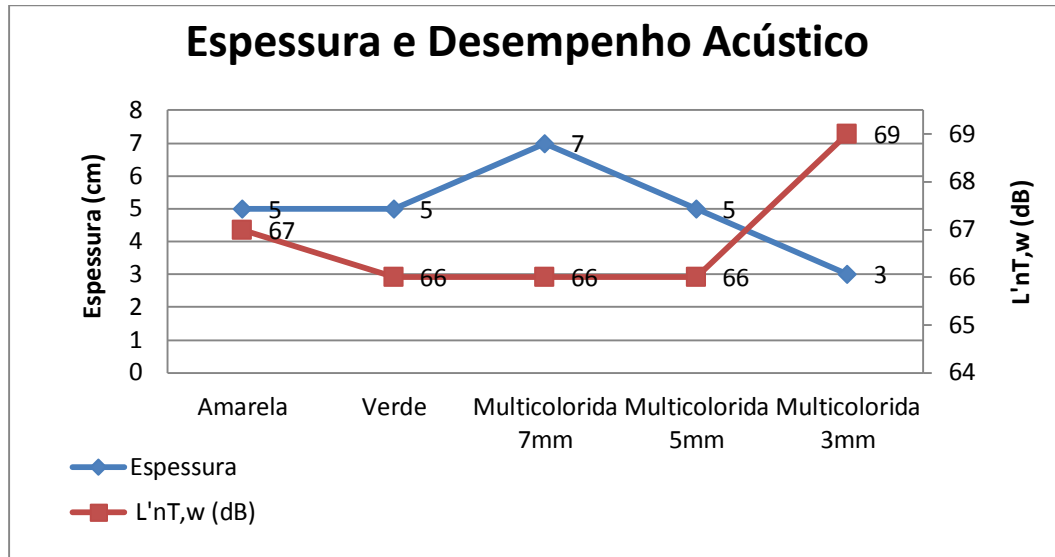
Figura 19: Gráfico Relacionando Rigidez Dinâmica e Desempenho Acústico



Com relação as espessuras das mantas. A diferença de desempenho acústico entre a manta multicolorida de 3mm e a manta multicolorida de 7mm é de 3dB. O que confirma a

afirmação de Pedroso (2007) sobre a relação entre espessura da camada e desempenho acústico. O gráfico da figura 20 apresenta a variação do desempenho acústico com a espessura do material

Figura 20: Relação entre Espessura e Desempenho Acústico



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria do desempenho acústico é uma necessidade real nas edificações contemporâneas. Os padrões de desempenho instituídos na NBR 15575/2013 fomentam a necessidade de desenvolver estudos sobre novos materiais e equipamentos para tratar da questão do ruído

Sobre o desempenho acústico das mantas de SBR estudadas percebeu-se o decréscimo de ruído na ordem de 12%. Em comparação com o decréscimo de aproximadamente 20% obtido pela manta Sound Soft, comercial.

A melhoria de desempenho acústico apresentada com a utilização das mantas de SBR não foi suficiente para mudar o enquadramento do sistema de piso com relação ao desempenho acústico. Mesmo incorrendo em uma diferença de 9dB em relação ao sistema padrão a adoção das mantas não possibilitou uma melhora na classificação quanto ao desempenho acústico da edificação.

As diferenças apresentadas entre os sistemas padrão, lajes nuas, também apresentam papel importante no desempenho acústico final dos sistemas. A diferença nos materiais, espessuras e condições de contorno das lajes podem ser responsáveis pelas diferenças de desempenho apontadas.

Não foi possível relacionar as rigidezes dos materiais de SBR com o desempenho acústico normatizado dos mesmos.

As características do SBR do ponto de vista elástico são próximas as da manta de grânulos de pneu, mas o comportamento de isolamento é diferenciado. Tal situação se explica pelo fato dos pisos flutuantes apresentarem níveis de amortecimento altos em sua camadas resilientes o que leva a necessidade de abordar considerações sobre amortecimento no modelo dinâmico que descreve o problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15575 - 1 - Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais.** Rio de Janeiro: 2013.

ABNT. **NBR 15575 - 3 - Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos.** Rio de Janeiro: 2013.

ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2014.

ABNT. **NBR 8800 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.** Rio de Janeiro:2008

ANFLOR, C. T. M. **Estudo da Transmissibilidade da Vibração no Corpo Humano na Direção Vertical e Desenvolvimento de um Modelo Biodinâmico de Quatro Graus de Liberdade.** Porto Alegre: UFRGS, v. Dissertação de Mestrado, 2003.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. J. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática.** 5ª. ed. São Paulo: MaKron Books, 1994.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A. D. **Introdução à Dinâmica das Estruturas para a Engenharia Civil.** São Paulo: Blucher, 2013.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures.** 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, 2003.

COSTA, E. C. D. **Acústica Técnica.** São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

DIOGENES, H. J. F. **Análise Tipológica de Elementos e Sistemas Construtivos Pré-Moldados de Concreto do Ponto de Vista de Sensibilidade a Vibrações em Serviço.** São Carlos: USP. 2010. Dissertação de Mestrado

FERRAZ, R. **Atenuação de Ruído de Impacto em Pisos de Edificações de Pavimentos Múltiplos.** Belo Horizonte: UFMG. Dissertação de Mestrado, 2008.

ISO. **ISO 9052 - 1 - Acoustics - Determination of Dynamic Stiffness -Part 1: Materials Used Under Floating Floors in Dwellings.** 1989.

ISO. **ISO 140-7 - Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors.** 1998

ISO. **ISO 10052 - Acoustics - Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound - Survey method.**2004

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of Acoustic.** 4. ed. John Wiley & Sons Inc., 2000.

LONG, M. **Architectural Acoustics.** 2006.

MAHREHOLTZ, O.; BACHMANN, H. Damping. In: BACHMANN, H., et al. **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines.** Basel; Boston; Berlin: Birkhauser, 1995.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos.** Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2010.

MATEUS, D. **Acústica de Edifícios e Controle de Ruído.** 2008.

NEVES, A.; ANTONIO, J.; NOSSA, A. **Resultados Experimentais da Rigidez Dinâmica de Materiais Usados sob Pavimentos Flutuantes.** In: Acústica Universidade de Coimbra, 2008. Coimbra, 2008.

PEDROSO, M. A. T. **Estudo Comparativo Entre as Modernas Composições de Pisos Flutuantes Quanto ao Desempenho no Isolamento ao Ruído de Impacto.** Dissertação de Mestrado. Santa Maria: UFSM, 2007.

SANTOS, F. A. D. **Avaliação de Placas Cimentícias com Resíduo de EVA quanto ao seu Nível de Isolamento Acústico em Sistemas de Pisos Flutuantes.** João Pessoa: UFPB, v. Dissertação de Mestrado, 2013.

SCIENTEC. **Avaliação da capacidade de isolamento para ruído de impacto de mantas de SBR expandido - Parecer técnico.** 2014

SORIANO, H. L. **Introdução à Dinâmica das Estruturas.** Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014.

VANDRAME, A. C. **Vibrações Ocupacionais**. Disponível em: http://www.higieneocupacional.com.br/download/vibracoes_vendrame.pdf. Acesso em 07 maio 2016

VOGT, Carlos. O silêncio, o som e o sentido. **ComCiência**, Campinas, n. 151, set. 2013 . Disponível em <http://comciencia.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-76542013000700001&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 12 abr. 2016.