

**ATENUAÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO EM PISOS DE
EDIFICAÇÕES DE PAVIMENTOS MÚLTIPLOS**

Rafaela Ferraz

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ATENUAÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO EM PISOS DE EDIFICAÇÕES
DE PAVIMENTOS MÚLTIPLOS"**

Rafaela Ferraz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. M.Sc. Marco Antônio de Mendonça Vecci
DEES- UFMG (Co-orientador)

Profª. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
UNICAMP

Prof. Dr. Antônio Cleber G. Tibiriçá
UFV

Prof. Dr. Fábio José Martins de Lima
UFJF

Belo Horizonte, 29 de agosto de 2008

DEDICATÓRIA

Ao meu grande amor Othávio.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus, por ter me abençoado com equilíbrio e perseverança para que conseguisse finalizar este Mestrado. Além Dele, muitas pessoas contribuíram direta ou indiretamente para o sucesso deste trabalho, e por isso agradeço...

Ao meu marido Othávio, grande amor da minha vida, pela paciência, dedicação, ensinamentos e cumplicidade.

Aos meus pais, Elaine e Carlos, aos meus irmãos, Thiago e Karoline, e aos meus cunhados Marcelo e Sheila, pelo amor e pelos conselhos, que mesmo distantes, foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Ao meu orientador Francisco C. Rodrigues pelo apoio e por acreditar neste trabalho.

Ao meu co-orientador Marco A. M. Vecci, pela dedicação e apoio nesses anos em Belo Horizonte e principalmente na elaboração desta Dissertação, que com certeza foi de grande valia na minha formação profissional.

Aos amigos Flávio, Janaína e Maíra pelo apoio, companheirismo e amizade verdadeira.

Aos amigos do LADAE (Laboratório de Dinâmica e Acústica Estrutural), Frederico e Richard principalmente, e também Bruno Kato, Luiz Felipe, André e Bárbara pela contribuição na execução dos experimentos e pela amizade.

À Construtora Castor, por ter disponibilizado espaço para a realização dos ensaios, em especial ao Engenheiro Luiz Drumond, que sempre mostrou entusiasmo à realização deste projeto, e também ao Engenheiro Rogério Labriola e demais funcionários desta Construtora.

Ao Engenheiro Flávio Gugliotti “in memoriam”, da empresa DBTRONICS, por ter disponibilizado a máquina geradora de ruído de impacto.

Às Empresas Silmar Marcenaria, Isover, Joongbo do Brasil, Flasan e Brasilite que forneceram os materiais e sistemas para a realização dos ensaios.

E à OPPUS Acústica Ltda., por ter disponibilizado os demais equipamentos de medição, viabilizando este projeto e tornando-o realidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. JUSTIFICATIVA	4
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	5
2.1. RUÍDOS EM EDIFICAÇÕES DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS.....	5
2.2. ISOLAMENTO DE RUÍDO AÉREO (PERDA POR TRANSMISSÃO).....	8
2.3. RUÍDO ESTRUTURAL.....	11
2.3.1. Propagação do ruído de impacto.....	12
2.3.2. Isolamento de ruído de impacto.....	14
2.3.3. Pisos flutuantes e forros suspensos.....	17
2.3.4. Fatores que influenciam o isolamento com pisos flutuantes	19
2.4. RADIAÇÃO SONORA GERADA POR SUPERFÍCIES.....	20
2.5. EXPRESSÕES ANALÍTICAS PARA PREDIÇÃO DE ISOLAÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO.....	26
2.6. NORMALIZAÇÃO.....	34
2.6.1. ISO 140-7: 1998 - Medições de Campo para Isolamento de Ruído de Impacto em Pisos	34
2.6.2. ISO 140-4: 1998 – Medições de Campo para Isolamento de Ruído aéreo entre ambientes	36
2.6.3. ISO 354: 2003 – Medição da Absorção Sonora em Ambiente Reverberante	36
2.6.4. ISO 717-2: 1996 – Isolamento de Ruído de Impacto	37
2.6.5. ASTM E989: 1989 – Classificação Padrão para Determinação da Classe de Isolamento de Impacto – CII	39
2.6.6. NBR 15575-3:2008 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos.....	41
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1. OBJETO DE ESTUDO	48
4.2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE ENSAIO.....	55
4.2.1. Material resiliente	55
4.2.1.1. Manta de polietileno.....	55
4.2.1.2. Manta de lã de vidro.....	56
4.2.2. Materiais de assoalho e contrapiso	56
4.3. EQUIPAMENTOS.....	57
4.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	58
4.4.1. Correção de ruído de fundo	59
4.4.2. Medição da perda por transmissão do piso, segundo ISO 140-4: 1998.....	59
4.4.3. Medição de absorção sonora, segundo ISO 354:2003	61
4.4.4. Medição do nível de ruído de impacto do piso, segundo ISO 140-7:1998.....	61

4.4.5. Medição do nível de ruído de impacto de pisos, utilizando pisos simplificados	61
4.4.6. Classificação dos resultados dos ensaios	64
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1. ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO EM PISOS FLUTUANTES COMPLETOS	66
5.2. COMPARAÇÃO ENTRE AS 16 CONFIGURAÇÕES DE PISOS FLUTUANTES COMPLETOS	81
5.3. ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO EM PISOS FLUTUANTES SIMPLIFICADOS	90
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS: PISOS FLUTUANTES SIMPLIFICADOS VS PISOS FLUTUANTES COMPLETOS (ISO 140-7).....	108
5.5. $\Delta L'n$ PISOS FLUTUANTES SIMPLIFICADOS E $\Delta L'n$ PISOS FLUTUANTES COMPLETAMENTE INSTALADOS (ISO)	113
5.6. COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS FHA (1967) E NBR 15575-3:2008.....	121
6. CONCLUSÕES.....	124
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
6.2. PROPOSTA PARA FUTUROS TRABALHOS.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXOS.....	132

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Tipos de fontes de ruído aéreo (MEHTA, 1999).....	5
FIGURA 2 - Outras fontes de ruído aéreo (FAHY, 1987).	6
FIGURA 3 – Tipos de fontes de ruído estrutural (MEHTA, 1999).....	6
FIGURA 4 – Fonte que produz ruído aéreo e estrutural (MEHTA, 1999).....	7
FIGURA 5 – Som incidente, transmitido, refletido e absorvido (SOUZA et al, 2006). ..	8
FIGURA 6 – Transmissão de ruído aéreo entre dois ambientes adjacentes (LONG, 2006).	9
FIGURA 7 – Outras fontes de ruído estrutural (FAHY, 1987).	11
FIGURA 8 - Impacto produzindo ondas de vibração na barra (MEISSER, 1973)	12
FIGURA 9 – Efeito do corte na barra (MEISSER, 1973)	12
FIGURA 10 – Corte na barra: material rígido (esquerda) e material flexível (direita) - (MEISSER, 1973).....	13
FIGURA 11 – Ponte acústica (MEISSER, 1973).	13
FIGURA 12 – Material flexível na extremidade da barra (MEISSER, 1973).....	14
FIGURA 13 - Mecanismos de isolamento de ruído de impacto.....	15
FIGURA 14 – Resultado dos ensaios com lã de vidro como material resiliente (AKKERMAN, 1996).....	18
FIGURA 15 – Modelo de problema de radiação sonora gerada por superfícies (FAHY, 2001).....	20
FIGURA 16 – Esquema de modelo energético (FAHY, 2001).....	21
FIGURA 17 – Lados e cantos como fontes de radiação (FAHY, 1987)	23
FIGURA 18 – Caso unidimensional: modo simétrico e anti-simétrico (FAHY, 1987). 24	
FIGURA 19 – Curva de dissipação para uma placa tipo “sanduíche” (FAHY, 1987)...	25
FIGURA 20 – Modelo físico simplificado de um piso flutuante (BISTAFA, 2006). ..	226
FIGURA 21 – Curvas típicas de isolamento de ruído de impacto (SANCHO et al., 1982).	29
FIGURA 22 – Redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n) para piso flutuante excitado com (a) máquina de ruído de impacto padronizada e (b) sapatos de salto alto (BISTAFA, 2006).....	32
FIGURA 23– Redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n) para piso flutuante excitado sobre (a) contrapiso de concreto de 3,5cm sobre manta de lã de vidro e laje de concreto de 13cm e (b) contrapiso de asfalto de 2,5cm sobre manta de lã de vidro e laje nervurada de 20cm com capa de concreto de 5cm (CREMER, 1988).	33
FIGURA 24 – Curva dos valores de referência de ruído de impacto, bandas de terço de oitava.....	38
FIGURA 25 – Exemplo de como encontrar L'_{nw}	39
FIGURA 26 – Curva de referência, segundo ASTM E989:1989.....	40
FIGURA 27 - Pontos de excitação de impacto – suíte do piso de ensaio.....	49
FIGURA 28 – Detalhe do piso de ensaio	50
FIGURA 29 – Pontos de medição sonora – suíte abaixo do piso de ensaio.....	50
FIGURA 30 – Corte BB	51
FIGURA 31 – Corte AA.....	52
FIGURA 32 – Lã de vidro (em amarelo) sob contrapiso (em cinza) e assoalho (em madeira) – (www.isover.com.br).....	556

FIGURA 33 – Máquina geradora de ruído de impacto – Padrão ISO 140-7.....	58
FIGURA 34– Perda por transmissão – posições da fonte e das medições do pavimento superior	600
FIGURA 35 – Posição da castanhola e do protótipo no pavimento superior.....	633
FIGURA 36 – Posição dos pontos de medição no pavimento inferior.....	644
FIGURA 37– L'n da Configuração 1	677
FIGURA 38– L'n da Configuração 2	688
FIGURA 39– L'n da Configuração 3	699
FIGURA 40– L'n da Configuração 4	699
FIGURA 41– L'n da Configuração 5	70
FIGURA 42– L'n da Configuração 6	71
FIGURA 43– L'n da Configuração 7	72
FIGURA 44– L'n da Configuração 8	72
FIGURA 45– L'n da Configuração 9	73
FIGURA 46– L'n da Configuração 10	74
FIGURA 47– L'n da Configuração 11	75
FIGURA 48– L'n da Configuração 12	75
FIGURA 49– L'n da Configuração 13	776
FIGURA 50– L'n da Configuração 14	77
FIGURA 51– L'n da Configuração 15	78
FIGURA 52– L'n da Configuração 16	78
FIGURA 53 – Comparação entre as Configurações 3 e 4.....	81
FIGURA 54 – Comparação entre as Configurações 4 e 5.....	82
FIGURA 55 – Comparação entre as Configurações 2 e 5.....	83
FIGURA 56 – Comparação entre as Configurações 2 e 9.....	83
FIGURA 57 – Comparação entre as Configurações 8, 9 e 10.....	84
FIGURA 58 – Comparação entre as Configurações 7 e 11.....	85
FIGURA 59 – Comparação entre as Configurações 10 e 12.....	886
FIGURA 60 – Comparação entre as Configurações 2 e 13.....	87
FIGURA 61 – Comparação entre as Configurações 9 e 14.....	87
FIGURA 62 – Comparação entre as Configurações 6 e 15.....	88
FIGURA 63 – Comparação entre as Configurações 13 e 16.....	89
FIGURA 64 – Comparação entre as Configurações 01 e 02, dos pisos simplificados...	93
FIGURA 65 – Comparação entre as Configurações 04 e 05, dos pisos simplificados...	94
FIGURA 66 – Comparação entre as Configurações 06 e 07, dos pisos simplificados...	95
FIGURA 67 – Comparação entre as Configurações 08 e 09, dos pisos simplificados.	996
FIGURA 68 – Comparação entre as Configurações 11 e 12, dos pisos simplificados...	97
FIGURA 69 – Comparação entre as Configurações 03, 11, 13 e 14, dos pisos simplificados.....	98
FIGURA 70 – Comparação entre as Configurações 15 e 17, dos pisos simplificados...	99
FIGURA 71 – Comparação entre as Configurações 16 e 18, dos pisos simplificados.	100
FIGURA 72 – Comparação entre as Configurações 17 e 19, dos pisos simplificados.	101
FIGURA 73 – Comparação entre as Configurações 19 e 20, dos pisos simplificados.	102
FIGURA 74 – Comparação entre as Configurações 22, 23 e 24, dos pisos simplificados.	103
FIGURA 75 – Comparação entre as Configurações 12, 21 e 25, dos pisos simplificados.	104

FIGURA 76 – Comparação entre as Configurações 26, 27, 28 e 29, dos pisos simplificados.	105
FIGURA 77 – Comparação entre as Configurações 15, 30, 31 e 32, dos pisos simplificados.	10106
FIGURA 78 – Comparação entre as Configurações 33 e 34, dos pisos simplificados.	107
FIGURA 79 – Comparação entre Configuração 1 (Piso Simplificado) e Configuração 9 (Piso Completo).	109
FIGURA 80 – Comparação entre Configuração 2 (Piso Simplificado) e Configuração 2 (Piso Completo).	110
FIGURA 81 – Comparação entre Configuração 16 (Piso Simplificado) e Configuração 16 (Piso Completo).	111
FIGURA 82 – Comparação entre Configuração 35 (Piso Simplificado) e Configuração 1 (Piso Completo).	112
FIGURA 83 –Delta L'n da Configuração 6 (Piso completo: laje+contrapiso).	117
FIGURA 84 – Comparação de Delta L'n entre Configuração 1 (Piso Simplificado) e Configuração 9 (Piso Completo).	118
FIGURA 85 – Comparação de Delta L'n entre Configuração 2 (Piso Simplificado) e Configuração 2 (Piso Completo).	119
FIGURA 86 – Comparação de Delta L'n entre Configuração 16 (Piso Simplificado) e Configuração 16 (Piso Completo).	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Velocidade de propagação das ondas de vibração em um material (KINSLER, 1973).....	12
TABELA 2 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,w}$, para ensaios de campo e R_w para ensaios em laboratório.....	41
TABELA 3 – Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, $L'_{nT,w}$ para ensaios de campo.....	41
TABELA 4 – Configurações dos 32 ensaios de piso flutuante simplificados.....	53
TABELA 5 – Configuração dos 16 ensaios de piso flutuante completos.....	54
TABELA 6 – Propriedades estruturais da manta de polietileno (MACHADO, 2003) ..	55
TABELA 7- Valores de referência de CII recomendados pelo FHA (BERENDT, 1967)	655
TABELA 8 – Resultado das medições das diferentes configurações de piso flutuante completo.....	80
TABELA 9 – Resultado das medições das diferentes configurações de piso flutuante simplificado	91
TABELA 10 – Comparação dos valores de CII entre sistemas de pisos flutuantes completos e simplificados.....	108
TABELA 11 – Comparação dos valores de L'_{nw} entre sistemas de pisos flutuantes completos e simplificados.....	108
TABELA 12 - $\Delta L'n$ e $\Delta L'nw$ dos pisos flutuantes completos	113
TABELA 13 - ΔL e ΔLw dos pisos flutuantes completos segundo ISO 717-2.....	114
TABELA 14 - $\Delta L'n$ e $\Delta L'nw$ dos pisos flutuantes simplificados	115
TABELA 15 - ΔL e ΔLw dos pisos flutuantes simplificados segundo ISO 717-2	116
TABELA 16 - Valores de referência de CII segundo FHA (BERENDT, 1967).....	121
TABELA 17 - Valores de referência de L'_{nw} recomendados pela norma brasileira NBR15575-3	121
TABELA 18 – Análise comparativa entre FHA e NBR15575-3:2008	122

RESUMO

No Brasil e em diversos países, o desenvolvimento de sistemas construtivos para proporcionar conforto acústico em edificações tem sido uma constante preocupação para a melhoria da qualidade de vida nos dias de hoje. O incômodo provocado por ruído de impacto em pisos de edificações de andares múltiplos, devido à queda de objetos e pessoas caminhando, pode ser atenuado a partir da elaboração de projeto e detalhamento do piso. Nesta pesquisa, estudaram-se princípios básicos de acústica de edificações e seus sistemas de controle de ruído com vistas a subsidiar o projeto de pisos em edificações. Nesse contexto, foi realizado levantamento das normas e critérios utilizados para classificar condições de conforto, o que embasou a realização de estudos experimentais de ruído de impacto em pisos de edificações de múltiplos pavimentos. Foram efetuados 16 ensaios em conformidade com as normas ISO 140-7:1998, como estudos de casos, para determinar as propriedades acústicas de isolamento de ruído de impacto em sistemas de pisos flutuantes. A análise e interpretação dos resultados experimentais mostraram que todas as configurações de pisos flutuantes ensaiados em conformidade com a ISO 140-7:1998, estão de acordo com os valores de referência recomendados pela FHA. Também foram realizados estudos de casos utilizando procedimentos de ensaios simplificados em 32 sistemas de pisos flutuantes reduzidos. A comparação dos resultados obtidos entre os ensaios simplificados e os ensaios realizados de acordo com as normas ISO 140-7:1998, identifica diversos aspectos referentes à equivalência entre estes ensaios, tanto no aspecto global quanto no espectral. Verificou-se que os valores globais encontrados nos ensaios simplificados foram similares aos dos pisos flutuantes realizados de acordo com a norma ISO 140-7:1998, e que os valores espectrais apresentaram inúmeras divergências. Neste trabalho também foram efetuadas comparações entre critérios de isolamento de impacto de pisos estabelecidos nas normas brasileiras e os recomendados pela FHA (EUA), à luz dos resultados obtidos nos ensaios de pisos flutuantes. Constatou-se que os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15575-3: 2008 estão bem menos restritivos que os critérios recomendados pela FHA. Ressalta-se também, que os critérios da NBR 15575-3: 2008 estão exigindo desempenho de isolamento de ruído de impacto de pisos bem inferiores aos sistemas construtivos atualmente praticados no país.

ABSTRACT

In Brazil as well in many countries, the development of constructive systems to provide acoustic comfort in buildings has been a permanent concern nowadays in order to improve the life quality of its users. The annoyance caused by impact noise in multi-story buildings generated by object fall and footfall can be controlled within the floor project and detailing. In this research, some concepts of building acoustic and its noise control systems are studied to support the floor project in buildings. Within this context, the standard and criterion were researched and collected in order to classify comfort conditions which gave the basis for the realization of experimental studies of impact noise in multi-story buildings floors. Thus, 16 tests were performed in accordance with ISO 140-7:1998, as case studies, for the determination of the acoustic properties of noise impact isolation in floating floor systems. The analysis and interpretation of experimental results showed that every studied floating floor systems, with resilient materials tested in accordance with ISO 140-7:1998, complies with the reference values recommended by the FHA. Were also realized case studies using simplified tests proceedings in 32 reduced floating floor systems. Comparison of performance results between the simplified tests and those realized in compliance with ISO 140-7:1998, identifies various aspects related to the equivalence between these tests, both global and spectral aspects. Verify that the global values was found in simplified tests were similar to those of floating floors made in accordance with ISO 140-7:1998, and spectral values showed many differences. This work was also made comparisons between the criteria of impact insulation of floors established by the Brazilians' standards and those recommended by FHA (USA), in the light of results from tests of floating floors. It was found that the criteria established by ABNT NBR 15575-3: 2008 are much less restrictive than the criteria recommended by the FHA. It is also, that the criteria of NBR 15575-3: 2008 are demanding performance of the impact of noise insulation of floors well below the constructive systems currently practiced in the country.

1.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas construtivas para proporcionar conforto acústico em edificações de múltiplos pavimentos habitacionais tem sido uma constante preocupação em vários países. Ainda que pouco explorada, no Brasil, a temática, entretanto, vem ganhando espaço em instituições de ensino e pesquisa e em empresas privadas, tanto para gerar conhecimentos como para disseminá-los de forma a catalisar suas aplicações na indústria da construção civil.

Para que um sistema construtivo possa satisfazer as exigências de conforto auditivo em edificações, torna-se necessário o estudo do seu desempenho acústico. A proposição e análise de novas soluções com diretrizes na área de acústica das construções, visando ao conforto e desempenho das edificações, são de grande interesse técnico, científico e social no âmbito nacional. Dessa forma, a engenharia e a arquitetura cumprem uma importante função social quando provêm habitações acusticamente apropriadas para os usuários.

Níveis de ruído acima dos aceitáveis pelos usuários causam, além de incômodos, interferências no desempenho de tarefas, na inteligibilidade da fala e no sono. De um modo geral, para os seres humanos, o ruído também afeta a saúde e o bem-estar. A

exposição a ruídos intermitentes por períodos prolongados, como os encontrados usualmente em edificações de múltiplos pavimentos (ruído hidráulico, ruído de impacto em pisos, etc.), podem causar diversos efeitos psico-fisiológicos nos indivíduos como estresses e hipertensão.

As condições mitigadoras acústicas para os ambientes devem levar em conta a convivência dos usuários com níveis aceitáveis de ruídos no interior das edificações, já que é praticamente impossível e também indesejável eliminá-los completamente. Algum nível de ruído é plenamente aceito no processo de discriminação auditiva que leva os seres humanos a expressarem a sua sensação de bem estar. Por exemplo, qualquer pessoa que passar certo tempo numa câmara anecóica¹ saberá que um recinto com silêncio total pode ser tão perturbador quanto um ambiente ruidoso.

Nesse sentido, o isolamento do ruído de impacto em pisos de edificações é de grande interesse para garantir condições de habitabilidade e salubridade acústica em ambientes residenciais. Esse tipo de ruído é produzido por impactos nos elementos da edificação, como a queda de objetos, podendo gerar incômodos nos usuários de ambientes adjacentes (LONG, 2006).

Construtivamente, têm sido empregados sistemas que combinam pisos flutuantes e forros suspensos, como recursos para isolar ruídos de impactos.

Após avaliação de um sistema piso-forro, por meio de ensaios de ruído de impacto em pisos, utilizando metodologias de ensaios em conformidade com as normas ISO 140-7:1998 e ISO 354:2003, o Nível de Pressão Sonora de Impacto Normalizado Ponderado (L'_{nw}) pode ser calculado de acordo com a norma ISO 717/2 e a Classe de Isolamento de Impacto (CII) segundo a norma ASTM E 989:1989. O valor de L'_{nw} , bem como da CII, é um número único ponderado que indica como o piso se comporta diante do ruído gerado pela máquina de ruído de impacto padrão, a qual reproduz ruídos com níveis de referência para avaliar os ruídos comumente encontrados em edificações de múltiplos pavimentos, como o caminhar de pessoas e a queda de objetos sobre o piso.

Observado o contexto acima apresentado, neste trabalho, foram efetuadas análises utilizando os níveis de critérios de referência recomendados pela *Federal Housing*

¹ Câmara anecóica – câmara na qual todas as superfícies são tratadas com material absorvedor, resultando em um ambiente “morto”, sem campo reverberante.

Administration – FHA, do United States Department of Housing and Urban Development – HUD (BERENDT, 1967). Tais critérios foram estabelecidos em 1967 pelo FHA e, desde então, vêm se constatando que as edificações e os sistemas construtivos que em conformidade com eles possuem boas condições de isolamento sonoro entre unidades habitacionais e, em geral, satisfazem às exigências da maioria dos seus ocupantes.

Também foram efetuadas análises comparativas entre os níveis critérios recomendados pela FHA e os níveis critério propostos pela norma ABNT NBR 15575-3:2008 - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver configurações de sistemas de pisos flutuantes e avaliar o desempenho quanto ao controle de ruído de impacto em pisos de edificações de andares múltiplos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar e quantificar elementos construtivos para controle de ruído de impacto de pisos;
- Realizar estudos de casos com o uso de normas ISO em 16 ensaios para determinação das propriedades acústicas de isolação de ruído de impacto em sistemas de pisos flutuantes;
- Comparar resultados de desempenho entre diversas combinações de sistemas de piso flutuante;
- Realizar estudos de casos para avaliar procedimento de ensaio com sistemas simplificados de piso flutuante;
- Comparar resultados obtidos entre os ensaios de sistemas de piso flutuante simplificados e os ensaios realizados em conformidade com as normas ISO 140-7.
- Comparar critérios estabelecidos em normas brasileiras com critérios recomendados pela FHA (EUA), à luz dos resultados obtidos nos ensaios de pisos flutuantes.

1.2. Justificativa

A análise de ruído de impacto de pisos é um tema ainda pouco explorado no cenário brasileiro (MACHADO, 2003). Embora diversos trabalhos similares ao proposto venham sendo desenvolvidos em outros países (TADEU *et al*, 2007), *cabe ressaltar que os sistemas construtivos nacionais têm suas peculiaridades e, na maioria das vezes, grande parte dos dados publicados sobre o assunto no âmbito internacional, não se aplicam aos nossos sistemas construtivos*. Dessa forma, este trabalho buscou conhecer o comportamento do ruído de impacto em pisos de sistemas usualmente utilizados na construção civil nacional.

Além disso, o trabalho proposto vai ao encontro dos objetivos da norma ABNT NBR 15575-3: 2008, uma vez que fornece um banco de dados que pode ser utilizado como referência para rever os níveis críticos propostos nesta norma. A parte 3 desta norma se refere ao conforto acústico dos usuários, estabelecendo limites de ruído em diversas categorias padrões A, B e C, para ambientes residenciais.

Vale destacar também que foram constituídas condições de desenvolver esta pesquisa, apesar da dificuldade normalmente encontrada para a realização dos ensaios dessa natureza. A Construtora Castor disponibilizou o espaço necessário para realização dos ensaios, fornecendo inclusive a infra-estrutura de apoio logístico e a mão-de-obra para instalação e preparação dos ensaios, com suas diversas configurações.

O presente trabalho foi organizado da seguinte maneira: Capítulo 1 – Introdução, no qual apresenta-se o presente trabalho com seus objetivos e justificativa; Capítulo 2 – Contextualização do Problema, onde apresenta-se um estudo sobre desempenho acústico de edificações e sistemas de isolamento de ruído; Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica, no qual realizou-se um levantamento dos trabalhos sobre ruído de impacto de pisos realizados até 2008; Capítulo 4 – Materiais e Métodos, onde apresentam-se os ambientes, os materiais e as normas de ensaios acústicos; Capítulo 5 – Resultados e Discussões, no qual apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios acústicos; Capítulo 6 – Conclusões, no qual apresentam-se as considerações finais deste trabalho e as propostas para futuros trabalhos.

2.

CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Ruídos em Edificações de Múltiplos Pavimentos

Os ruídos gerados nas edificações de múltiplos pavimentos podem ser originados de distintas fontes, classificados como ruído aéreo ou ruído estrutural.

Os sons gerados pela conversa humana ou por instrumentos musicais são exemplos de ruído aéreo produzidos nas edificações (FIG 1). Ventiladores, motores, maquinários, aviões e automóveis são outras fontes que também produzem o ruído aéreo (FIG 2).

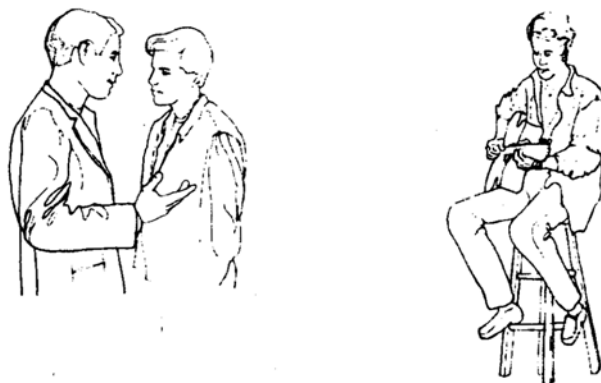


FIGURA 1– Tipos de fontes de ruído aéreo (MEHTA, 1999).

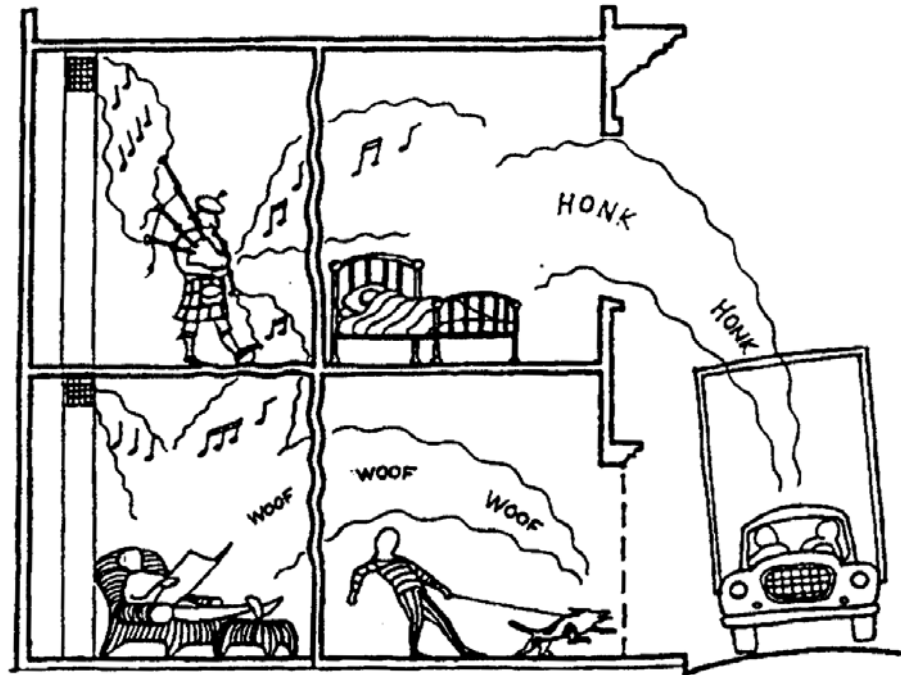


FIGURA 2 - Outras fontes de ruído aéreo (FAHY, 1987).

O ruído estrutural é, em geral, produzido por vibrações (impacto em pisos, motores, elevadores, ruído hidráulico, etc.) nos elementos da edificação – paredes, pisos, coberturas, entre outros. Assim, quando um prego está sendo afixado na parede, ou uma pessoa caminha sobre o piso, o ruído estrutural é produzido (FIG 3).

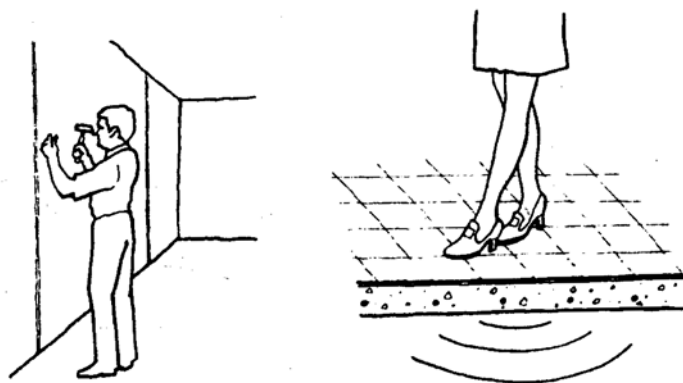


FIGURA 3 – Tipos de fontes de ruído estrutural (MEHTA, 1999).

A maioria das fontes produz tanto o ruído aéreo quanto o ruído estrutural. Ventiladores, por exemplo, geram ruído aéreo, enquanto que suas vibrações geram o ruído estrutural (FIG 4).

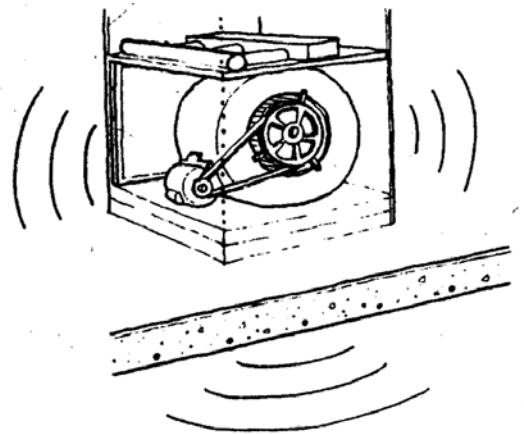


FIGURA 4 – Fonte que produz ruído aéreo e estrutural (MEHTA, 1999).

Segundo Lei Municipal de Belo Horizonte, nº 9.505 de 23 de janeiro de 2008, os diferentes tipos de ruído são classificados como:

- Ruído contínuo: aquele com flutuações de nível de pressão sonora tão pequenas que podem ser desprezadas dentro do período de observação;
- Ruído intermitente: aquele cujo nível de pressão sonora oscila bruscamente várias vezes, durante o intervalo de tempo de medição, sendo o período em que o nível sonoro se mantém constante igual ou superior a 01 (um) segundo;
- Ruído impulsivo: aquele que consiste de uma ou mais explosões de energia sonora, tendo, cada uma, duração inferior a 01 (um) segundo;
- Ruído de fundo: nível de som equivalente, expresso na curva de ponderação "A" de todo e qualquer ruído que esteja sendo captado e que não seja objeto das medições sonoras, no local e horário considerados;

O nível máximo de ruído aceitável no interior de um ambiente está relacionado ao seu tipo de ocupação. Para recintos onde existem atividades que demandam baixo ruído de fundo, como estúdios de gravação e salas de concerto, dentre outros, o nível de ruído aceitável deve ser bem inferior aos limites aplicáveis a escritório.

Geralmente, o nível de ruído aceitável no interior de um recinto é baseado no grau de interferência produzido pelo ruído no desenvolvimento de tarefas realizadas neste recinto. Por outro lado, o nível de ruído aceitável em áreas externas, em geral, está relacionado com o grau de incômodo gerado ao ser humano. Em uma fábrica ruidosa,

por exemplo, o nível de ruído tolerável deve estar relacionado ao risco de danos à saúde do trabalhador, como perda auditiva, dentre outros.

2.2. Isolamento de Ruído Aéreo (Perda por Transmissão)

O isolamento acústico é uma das formas de se fazer o controle de propagação de ruído nas edificações. Segundo SILVA (1997), a transmissão do ruído de um ambiente para outro se faz de três maneiras distintas: pela passagem direta via parede ou painel; pela passagem indireta via flanqueamento, pelas frestas próximas a pilares, lajes e/ou paredes confluentes; por janelas, aberturas, portas, dutos de ar, tubos de água, eletrodutos, ou por entreforros e entrepisos.

Quando o som incide em uma determinada superfície (uma parede, por exemplo), parte dele é refletido, parte é absorvido dentro do material e parte é transmitido através do mesmo (FIG 5). A energia sonora absorvida pela parede é, em geral, dissipada em forma de calor ou em forma de vibração mecânica.

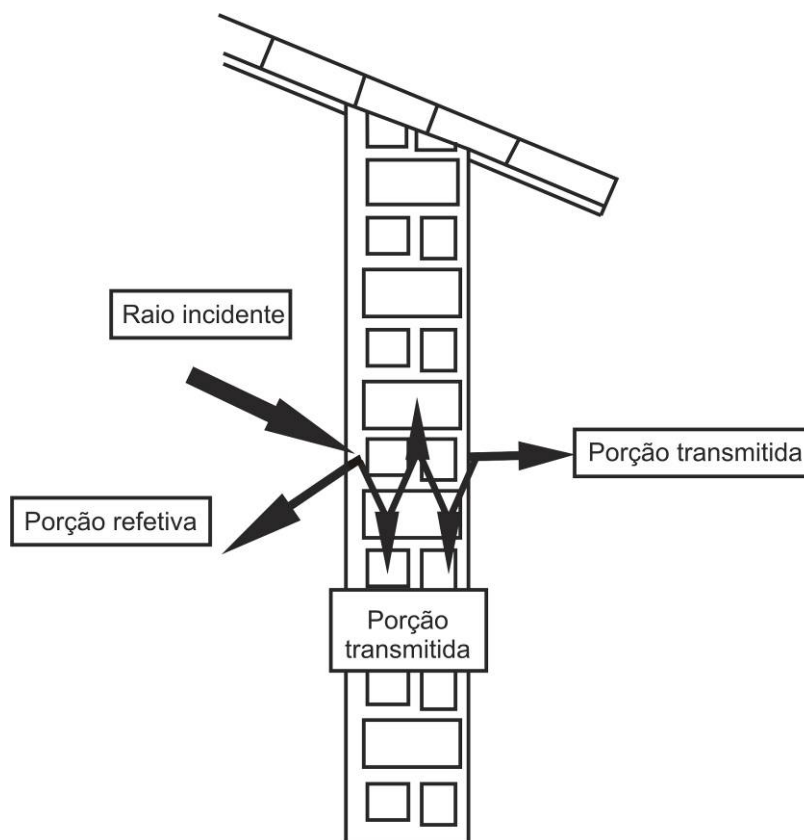


FIGURA 5 – Som incidente, transmitido, refletido e absorvido (SOUZA et al., 2006).

A transmissão do ruído aéreo de um espaço para outro através de divisórias está sujeita a algumas complexidades. No caso mais simples, existem dois ambientes separados por uma divisória (por exemplo, parede de alvenaria), com um campo difuso no ambiente da fonte, que produz uma pressão sonora e uma correspondente intensidade, a qual está incidindo na superfície onde haverá a transmissão (FIG 6). Uma fração da potência incidente é transmitida para o ambiente receptor através da divisória, onde é gerado o Nível de Pressão Sonora (NPS) neste ambiente.

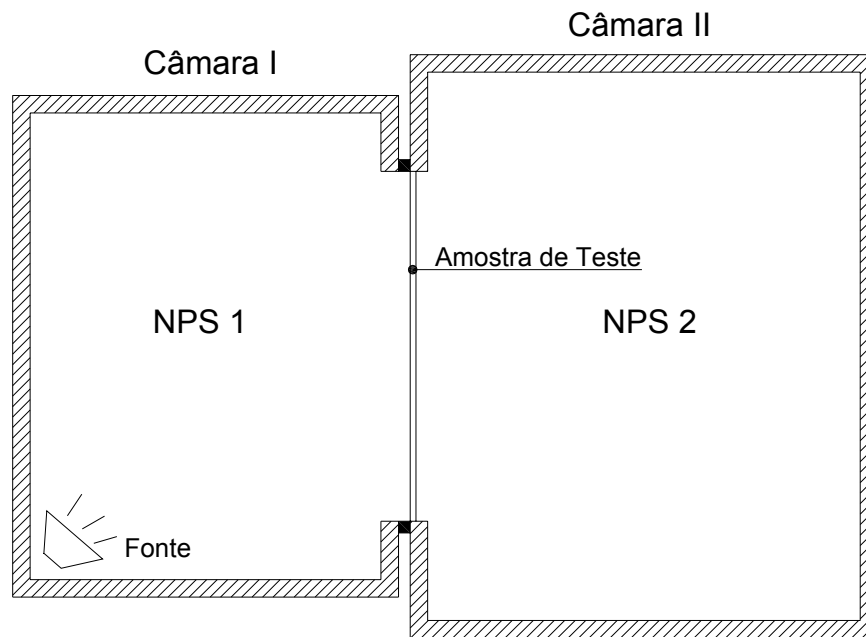


FIGURA 6 – Transmissão de ruído aéreo entre dois ambientes adjacentes (LONG, 2006).

O isolamento acústico ocorre quando se minimiza a transmissão de som de um ambiente para o outro ou do exterior para dentro do ambiente e vice-versa. A característica de isolamento sonoro de uma parede é normalmente expressa pela Perda por Transmissão (PT). Quanto maior a perda por transmissão, maior o isolamento acústico da parede e menor potência sonora será transmitida.

A Perda por Transmissão (PT), correspondente ao termo inglês *Transmission Loss* (TL), é expressa em decibéis (dB) e definida por:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (2.1)$$

onde, $\tau \rightarrow$ coeficiente de transmissão - razão entre a potência sonora transmitida e a incidente.

Em um componente com boa vedação acústica, τ será um número diminuto e PT um número expressivo.

A perda por transmissão pode ser definida também como o Nível de Pressão Sonora (NPS), correspondente ao termo inglês *Sound Pressure Level* (SPL), do ambiente que contém a fonte, menos o nível de pressão sonora do ambiente receptor, descontando-se a influência proveniente do campo reverberante neste ambiente receptor.

$$PT = NPS_{\text{ambiente da fonte}} - NPS_{\text{ambiente receptor}} - \text{Ruído reverberante}_{\text{ambiente receptor}} \quad (2.2)$$

O ruído do campo reverberante pode ser expresso por:

$$10 \log \left(\frac{\sum A\alpha}{S} \right) \quad (2.3)$$

onde,

S – área do componente testado;

A – área das superfícies do ambiente receptor;

α – coeficiente de absorção das superfícies do ambiente receptor.

A classificação de PT poderia ser obtida com a média dos valores de PT de cada frequência. Entretanto, essa média seria enganosa, já que mascara os resultados de menor valor da medição, geralmente presentes nas frequências mais baixas (63Hz – 250Hz), e ressalta os valores mais elevados, presentes nas frequências mais altas (4kHz – 8kHz). Assim, é conveniente utilizar um procedimento de classificação para caracterizar as propriedades de isolamento sonoro dos elementos construtivos. A utilização desse procedimento fornece a Classe de Transmissão Sonora (CTS), corresponde ao termo inglês *Sound Transmission Class* (STC), a qual é determinada de acordo com as normas ASTM.

2.3. Ruído estrutural

O ruído estrutural é originado por vibrações devido a impactos e/ ou excitações dinâmicas de naturezas diversas (excitações periódicas), em algum componente da edificação. As superfícies das edificações trabalham como amplificadores dos sons gerados por vibração; o impacto ou a vibração pode não gerar ruídos individualmente, mas se a fonte estiver conectada a uma parede, por exemplo, o ruído é amplificado devido à vibração produzida na parede (MEHTA, 1999).

O impacto, resultado de uma excitação de curta duração, pode ser repetitivo, mas normalmente não é periódico. Pessoas caminhando, dançando ou pulando, são exemplos claros de ruído de impacto. Outras fontes de impacto são pessoas praticando basquete, boliche, arrastando móveis, batendo porta etc. (FIG 7).

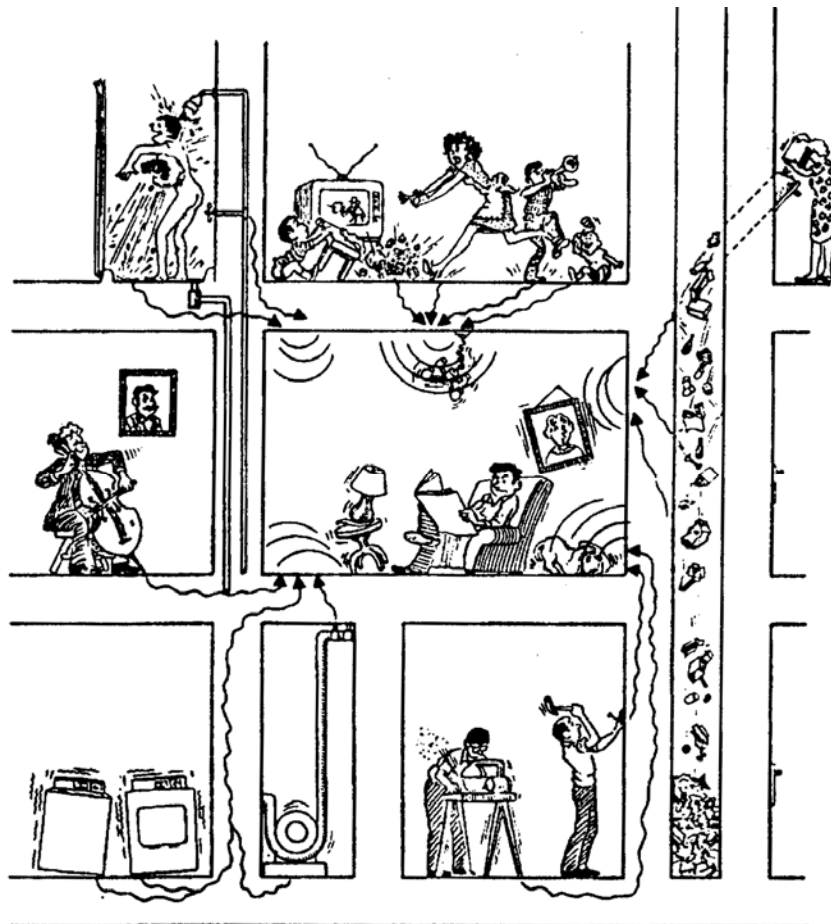


FIGURA 7 – Outras fontes de ruído estrutural (FAHY, 1987).

Vibrações geradas por excitações periódicas são normalmente produzidas por

equipamentos e maquinários, tais como, equipamentos de ar condicionado, ventiladores, motores de hidromassagem, etc. O controle de ruído gerado por esses sistemas é, em geral, obtido quando os equipamentos são instalados sobre materiais isoladores (molas ou elastômeros).

A vibração de pisos pode ser fonte de reclamações em estruturas de edifícios, particularmente em construções leves, tais como concreto sobre formas de aço incorporadas, *Steel Deck*, vigas metálicas ou de madeira e lajes de pequena espessura.

Os efeitos de excitações dinâmicas de piso não são limitados aos ambientes receptores localizados imediatamente abaixo da fonte. Por exemplo, em centros de ginástica, com caráter aeróbico, as vibrações induzidas podem ser percebidas lateralmente a 30m de distância numa mesma laje, ou a 10 pavimentos abaixo da fonte (LONG, 2006).

2.3.1. Propagação do ruído de impacto

A FIG 8 apresenta um esquema de propagação do ruído de impacto em uma barra de aço que é golpeada na sua extremidade e, no momento do choque, a energia transmitida propaga-se rapidamente ao longo desta. A barra vibra e emite um ruído aéreo.

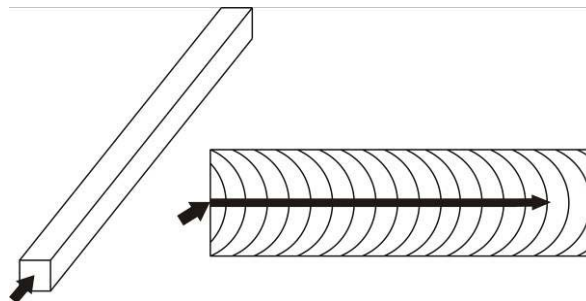


FIGURA 8 - Impacto produzindo ondas de vibração na barra (MEISSER, 1973)

A velocidade de propagação das ondas de vibração varia conforme o tipo de material excitado. A TAB 1 mostra a velocidade de propagação das ondas de vibração em diferentes materiais.

TABELA 1 – Velocidade de propagação das ondas de vibração em um meio material

Meio material	Velocidade [m/s]
Aço	6100
Concreto	3100
Madeira	3500
Água	1481
Ar	340

Fonte: (KINSLER, 1973)

Segundo MEISSER (1973), para se deter a propagação da vibração, pode-se separar a barra em duas barras, onde as ondas de vibração refletem-se na superfície desta não ultrapassando a outra parte (FIG 9).

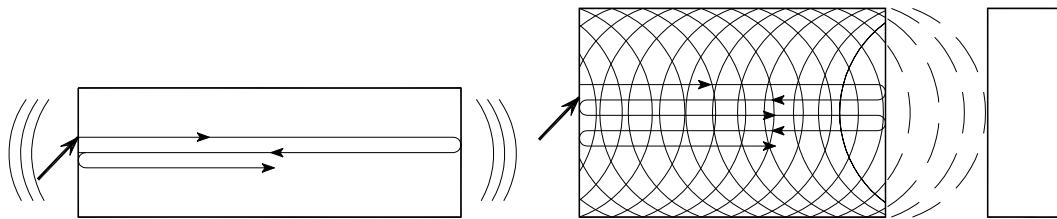


FIGURA 9 – Efeito do corte na barra (MEISSER, 1973)

Para reduzir a propagação do ruído de uma parte à outra, estas podem ser conectadas através de material resiliente. Nesse caso, embora parte da energia sonora de um lado da barra seja transmitida para a outra, esta fração de potência acústica transmitida é inferior àquela que seria transmitida sem a inserção do material resiliente.

A FIG 10 ilustra a absorção de energia conforme variação da flexibilidade do material resiliente colocado no corte da barra. Quando rígido, o material permite que uma pequena parte da energia seja refletida sobre si mesmo e o resto seja transmitido para a outra parte. Se o material for flexível e elástico, grande parte da energia é refletida e uma pequena porção da energia é transmitida ao restante da barra (MEISSER, 1973).

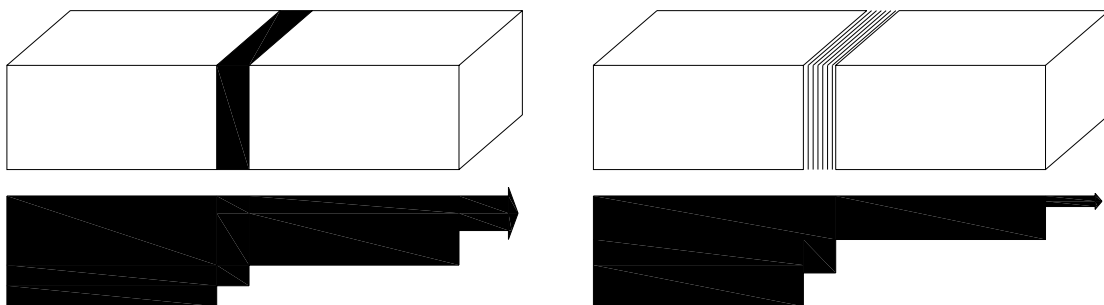


FIGURA 10 – Corte na barra: material rígido (esquerda) e material flexível (direita) - (MEISSER, 1973)

Cabe ressaltar que um caminho de transmissão acústica (ponte acústica) pode ser criada na presença de um vínculo rígido, no material resiliente, conectando uma extremidade da barra à outra (FIG 11). Observe que “as vibrações encontram um caminho apto para sua

propagação e a maior parte da energia passa de uma parte à outra através desta ligação rígida” (MEISSER, 1973).

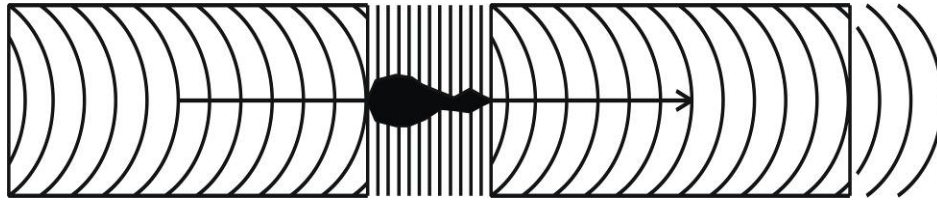


FIGURA11 – Ponte acústica (MEISSER, 1973).

Conforme indicado na FIG 12, ao se colocar o material flexível na origem do choque, a energia acústica gerada no impacto será reduzida.



FIGURA 12 – Material flexível na extremidade da barra (MEISSER, 1973).

2.3.2. Isolamento de ruído de impacto

O isolamento do ruído de impacto em pisos de edificações é de grande importância para o conforto acústico, principalmente em ambientes residenciais. Fontes de impacto como pessoas caminhando ou pulando, o choque de uma porta com a parede e a queda de um objeto no piso, causam vibração da estrutura, podendo gerar incômodo aos usuários dos ambientes adjacentes.

Isto ocorre porque se trata de uma eficiente excitação por contato, em que a laje se torna um irradiador de energia sonora em ampla faixa de frequências, devido ao movimento vibratório induzido pela excitação localizada (BISTAFA, 2006).

O ruído de impacto depende das características do objeto causador de impacto e do sistema do piso. Se o piso e o objeto que cair sobre ele tiver alta rigidez, o ruído resultante será significativo, de curtíssima duração, predominando as altas frequências. Se o piso for coberto por uma superfície de material resiliente² e o objeto que cair sobre ele for também resiliente, o ruído de impacto será reduzido, entretanto sua duração será mais prolongada.

De acordo com BRONDANI (1998), os materiais elásticos mais utilizados em pisos flutuantes são: espuma de polietileno; lã de vidro; borracha com baixa densidade; poliéster e poliestireno expandido elastizado (isopor). Além disso, estes materiais resilientes devem ter boa resistência mecânica (não endurecer), ter boa resistência química (não decompor-se, nem ter suas características alteradas pela umidade), ser incombustível e ser elástico, ou seja, ter baixa rigidez dinâmica (MÉNDEZ *et al.*, 1995).

Os mecanismos comumente usados para isolar o ruído de impacto são os sistemas que combinam pisos flutuantes e forros suspensos (FIG 13). Os pisos flutuantes são normalmente constituídos por placas sobre suportes resilientes usados para atenuar a propagação da onda mecânica, gerada pelo impacto, através da estrutura da edificação. Os forros suspensos são instalados sob o piso, formando um entre forro entre a laje estrutural e o forro do pavimento inferior. Normalmente estes forros são suspensos com molas ou elastômeros e revestidos internamente com material fono absorvente.

² Material resiliente – material com alta flexibilidade, elasticidade, ou seja, após cessada a deformação, volta ao seu estado original.

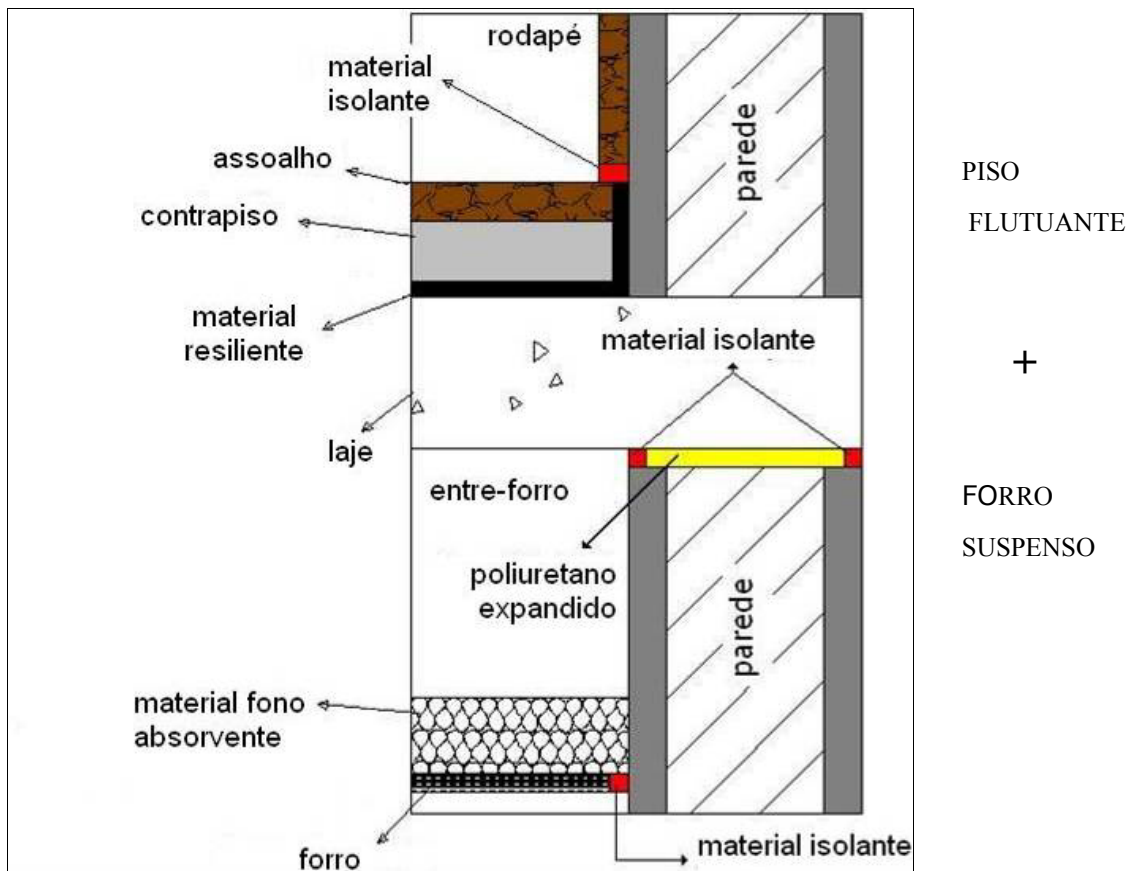


FIGURA 13 - Mecanismos de isolamento de ruído de impacto

A qualidade da atenuação do ruído de impacto de um sistema de piso flutuante, entre dois ambientes verticalmente adjacentes, pode ser avaliada realizando medições sonoras no pavimento inferior dos sons provenientes de um sistema gerador de ruído de impacto padronizado instalado no piso superior. Esse sistema gerador de ruído é constituído por uma máquina padrão, em conformidade com a norma ISO 140-7:1998, a qual gera ruído de impacto através da queda sequencial de uma série de pequenos pesos sobre o piso de ensaio. Os procedimentos de medição sonora também são realizados em conformidade com a norma ISO 140-7:1998.

Esses ensaios permitem determinar os ruídos nas diversas frequências, 1/3 ou 1/1 de oitava. Os Níveis de Pressão Sonora de Impacto Normalizados ($L'n$), assim como o Nível de Pressão Sonora de Impacto Normalizado Ponderado (L'_{nw}) e a Classe de Isolamento de Impacto (CII), são determinados pelas normas ISO 140-7, ISO 717-2 e ASTM E989:1989, respectivamente. O L'_{nw} e CII representam uma classificação do comportamento do sistema do piso submetido aos impactos gerados pela máquina de ruído padrão. CII está relacionado ao isolamento do piso, então quanto maior o CII

maior a propriedade de isolamento do piso. Já o L'_{nw} , está relacionado à transmissão acústica do piso, então quanto maior o L'_{nw} , menor a propriedade de isolamento do piso.

2.3.3. Pisos flutuantes e forros suspensos

Como mencionado acima, os mecanismos comumente usados para isolar o ruído de impacto são os sistemas de pisos flutuantes e os forros suspensos. Os pisos flutuantes são painéis com suportes resilientes, localizados acima do sistema estrutural (laje), que podem ser usados para atenuar a transmissão do ruído vertical e lateral, e transmissão de vibração. Do ponto de vista de isolamento acústico, o piso flutuante proporciona isolamento do ruído de impacto mais eficiente do que o forro suspenso. Além disso, também apresenta um melhor isolamento do ruído aéreo do que aqueles proporcionados pelos forros suspensos, uma vez que, em geral possuem mais massa.

Nos sistemas de pisos flutuantes, são normalmente utilizados isoladores de elastômeros, polietileno ou de fibra de vidro prensada. Tais isoladores devem ser protegidos, pois se tiverem contato com outros materiais como a água do concreto, eles poderão ser danificados e seus desempenhos comprometidos.

Ambientes como estúdios de gravação, onde altos valores de perda por transmissão são requeridos, pisos flutuantes combinados com forros suspensos podem vir a ser necessários para atender as necessidades de isolamento destes espaços. A massa do contrapiso do piso flutuante é importante por várias razões: provê massa adicional para atenuação de ruído aéreo e evita a ocorrência de deslocamentos acentuados que em geral danificam o contrapiso e o acabamento do piso flutuante. Pisos flutuantes leves tendem a ser flexíveis e as pessoas podem perceber qualquer pequeno movimento.

Cabe ressaltar que o piso flutuante é mais eficaz se estiver desacoplado das paredes. Sendo assim, os materiais isoladores devem ser utilizados também nos fechamentos verticais (paredes) do contrapiso, isolando-o não só da laje, mas de toda a estrutura, para que as vibrações induzidas no contrapiso pelos impactos não sejam transmitidos para outros pontos da estrutura. Além disso, este isolamento lateral é importante na prevenção de pontes acústicas nas ligações da estrutura como, por exemplo, através do rodapé.

Pisos monolíticos, como lajes de concreto maciças, com espessuras de 10 a 15cm, usualmente alcançam Classe de Transmissão Sonora (CTS) em torno de 52 (*Sound Transmission Class - STC*), limite em geral encontrado em edifícios com múltiplos pavimentos sem piso flutuante. No caso de lajes nervuradas, com 27cm de espessura e capeamento de 5cm, normalmente se alcança CTS em torno de 46, conforme ensaios realizados pelo Laboratório de Acústica e Dinâmica de Estruturas - LADAE/UFG. Para alcançar CTS mais elevados, devem-se usar outras técnicas construtivas, como pisos flutuantes.

Mediante ensaios realizados no IPT/SP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), AKKERMAN (1996) estudou sistema de piso flutuante utilizando lã de vidro como material resiliente. Os ensaios, realizados *in situ*, foram efetuados sobre uma laje de 120mm de espessura. As placas de lã de vidro, de diferentes densidades e espessuras, foram assentadas sob dois tipos de piso: piso acabado em madeira ipê e piso acabado em argamassa de cimento e areia. A FIG 14 mostra os resultados destes ensaios. Constatou-se que a lã de vidro mais espessa e com menor densidade (comparando com a lã de vidro de mesma espessura) obteve melhor resultado.

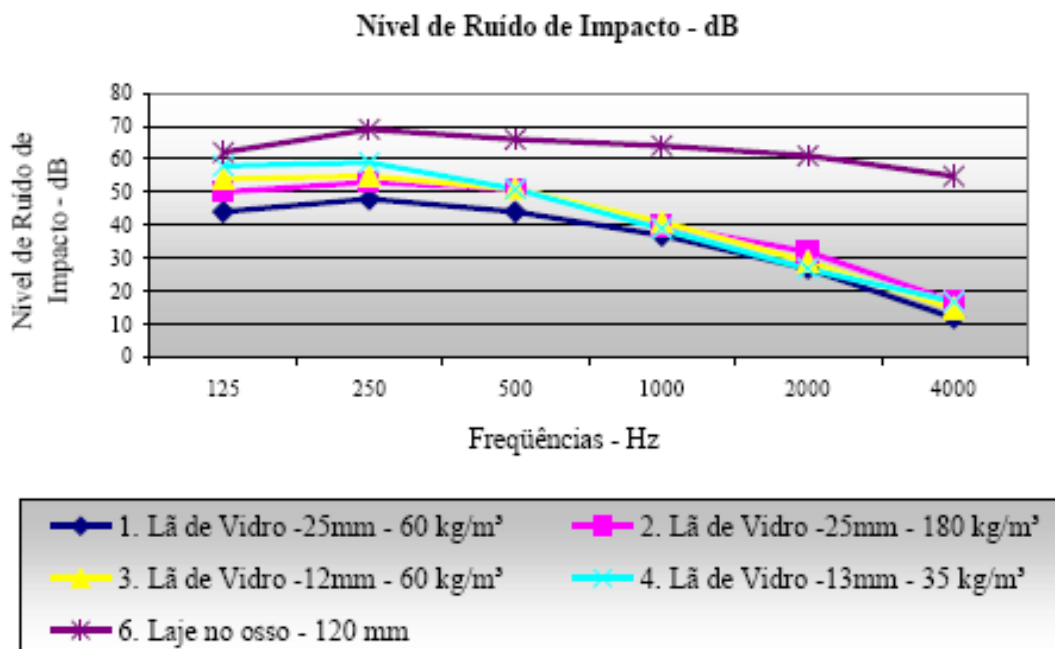


FIGURA 14 – Resultado dos ensaios com lã de vidro como material resiliente (AKKERMAN, 1996).

2.3.4. Fatores que influenciam o isolamento com pisos flutuantes

PUJOLLE (1978) relaciona os principais fatores que determinam a eficiência do isolamento de ruído de impacto de um piso flutuante:

a) Natureza e espessura do material resiliente: a rigidez dinâmica do material elástico de um piso flutuante é inversamente proporcional à sua espessura. Em estudos desenvolvidos no CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*), foram montados, sobre diferentes tipos de lajes estruturais, vários sistemas de piso flutuante, utilizando-se lã de rocha como material elástico. Foi verificado que dobrando-se a espessura do material resiliente houve em média um ganho de 4dB. Ou seja, para um piso flutuante de argamassa e placa cerâmica (espessura - 40 mm), com lã de rocha como material resiliente (espessura - 10 mm), executado sobre uma laje de concreto de 330 kg/m², o nível de ruído de impacto normalizado ponderado, L'nw, foi de 63dB. Ao duplicar a espessura da lã de rocha, o L'nw caiu para 59dB.

b) Natureza da laje estrutural: ensaios realizados no CSTB demonstraram que para uma laje de 160mm de espessura, o nível de ruído de impacto normalizado ponderado, L'nw, diminui na proporção de 1dB para um aumento de 10cm na espessura na laje. Esta conclusão foi obtida para lajes em situações idênticas àquelas consideradas nos ensaios no CSTB.

c) Sobrecarga da laje: outro fator que também pode influenciar o isolamento do ruído de impacto de piso é a sobrecarga da laje. O aumento de massa introduzido pela sobrecarga da laje, com móveis, por exemplo, pode alterar a frequência crítica do sistema de piso, já que o aumento da massa pode reduzir ou aumentar a rigidez dinâmica do material resiliente (elástico).

2.4. Radiação Sonora Gerada por Superfícies

O tratamento da radiação sonora gerada por superfícies deve levar em consideração a magnitude da vibração estrutural e sua transmissão e distribuição em relação à audibilidade do som, que é irradiado para a envoltória da superfície. Para prever a radiação sonora é necessário saber a amplitude da vibração em função da frequência e sua distribuição no espaço.

As FIGS 15 e 16 ilustram um problema de radiação sonora gerada por superfícies. A fonte introduz potência mecânica no componente diretamente excitado. Esse componente dissipa a porção dessa potência através do amortecimento e transfere o restante ao componente conectado a ele, que dissipa uma porção dessa potência internamente e irradia o restante para o ar. O número de graus de liberdade da estrutura pode ser aparentemente ser reduzida de centenas ou milhares (de modos) para dois, representando o tempo médio total de energia armazenada no componente (FAHY, 2001).

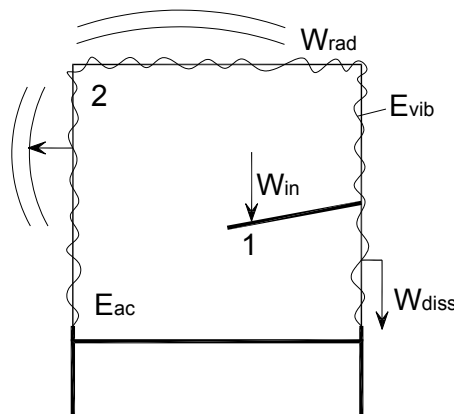


FIGURA 15 – Modelo de problema de radiação sonora gerada por superfícies (FAHY, 2001)

onde:

W_{in} – Potência introduzida;

W_{diss} – Potência dissipada;

W_{rad} – Potência irradiada;

E_{vib} – Energia de vibração;

E_{ac} – Energia acústica.

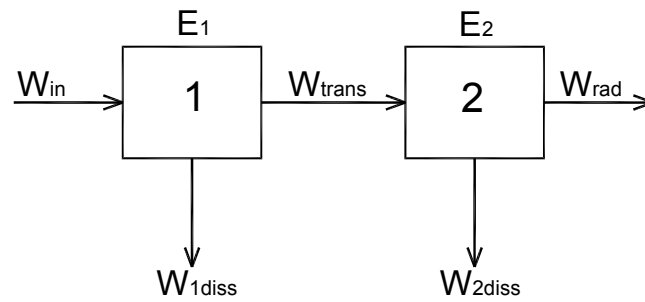


FIGURA 16 – Esquema de modelo energético (FAHY, 2001)

onde:

W_{in} – Potência introduzida;

W_{1diss} e W_{2diss} – Potências dissipadas;

W_{trans} – Potência transmitida;

W_{rad} – Potência irradiada;

E_1 – Energia de vibração;

E_2 – Energia acústica.

É desejável conhecer não apenas a potência irradiada, mas também a relação entre as vibrações estruturais e sua potência. Essa relação é descrita em termos da eficiência de radiação σ , definida como:

$$\sigma = \frac{W_{rad}}{\rho \cdot c \cdot S \cdot \langle v^2 \rangle} \quad (2.7)$$

onde, W_{rad} é a potência irradiada de uma estrutura com superfície de área S , e $\langle v^2 \rangle$ é o quadrado da velocidade média da superfície de radiação.

$$W_{rad} = \rho \cdot c \cdot S \cdot \langle v^2 \rangle \cdot \sigma_{rad} \quad (2.8)$$

Pode-se escrever também a Eq. (2.8) na forma logarítmica como:

$$10 \log \sigma_{rad} = L_p - L_v + 10 \log \frac{A}{4S} \quad [\text{dB}] \quad (2.9)$$

onde: A é a área de absorção equivalente;

L_p é o Nível de Potência;

L_v é o Nível de Velocidade.

Dessa forma, pode-se determinar a eficiência de radiação de uma estrutura medindo a média do nível de pressão sonora produzido em um ambiente reverberante, o nível de velocidade da área irradiadora e a área de absorção do ambiente (CREMER, 1988).

A potência irradiada também pode ser expressa como:

$$W_{rad} = \eta_{rad} \omega \bar{E} = \rho \cdot c \cdot S \cdot \langle v^2 \rangle \cdot \sigma_{rad} \quad (2.10)$$

onde \bar{E} é a energia de vibração e η_{rad} é o fator de perda de radiação.

Segundo FAHY (1987), a energia de vibração é duas vezes o valor da energia cinética e para painéis com densidade uniforme ρ_s e espessura h , a equação da energia de vibração é:

$$\bar{E} = \rho_s h S \langle v^2 \rangle \quad (2.11)$$

O fator de perda de radiação η_{rad} indica a magnitude do amortecimento da radiação acústica e raramente excede 10^{-3} em estruturas de engenharia vibrando no ar.

Vale ressaltar que a eficiência da radiação σ é sempre ≤ 1 . Segundo FAHY (1987), não há nenhuma razão física para que isso ocorra, entretanto é o que acontece na maioria dos casos práticos.

Para alcançar um bom desempenho no isolamento do ruído e da vibração de uma estrutura é necessário reduzir a eficiência de radiação. Para FAHY (1987), pode-se diminuir a energia sonora irradiada reduzindo-se o nível da velocidade da fonte sonora, a área de superfície interferindo na S e na σ , o comprimento da onda de flexão usando placas mais finas e removendo-se enrijecedores (apoios ou restrições) para diminuir o comprimento do contorno. Na prática, os efeitos adversos dos enrijecedores podem ser minimizados com o aumento do amortecimento da estrutura.

Como citado anteriormente, quando a frequência de propagação da onda de flexão num painel coincide com a frequência de propagação da onda acústica ω , esta frequência é conhecida como frequência crítica ou menor frequência de coincidência, ω_c . Entretanto,

o comportamento do painel é separado em duas situações: $\omega < \omega_c$ e $\omega > \omega_c$.

De acordo com FAHY (1987), em baixas frequências, quando a frequência natural de uma placa é menor que a frequência de coincidência³ ($\omega < \omega_c$: $\sigma \ll 1$), a radiação sonora tende a zero para placas infinitas com uma onda de flexão livre. Já em placas finitas, os lados e cantos resultam em fontes de radiação sonora (FIG 17).

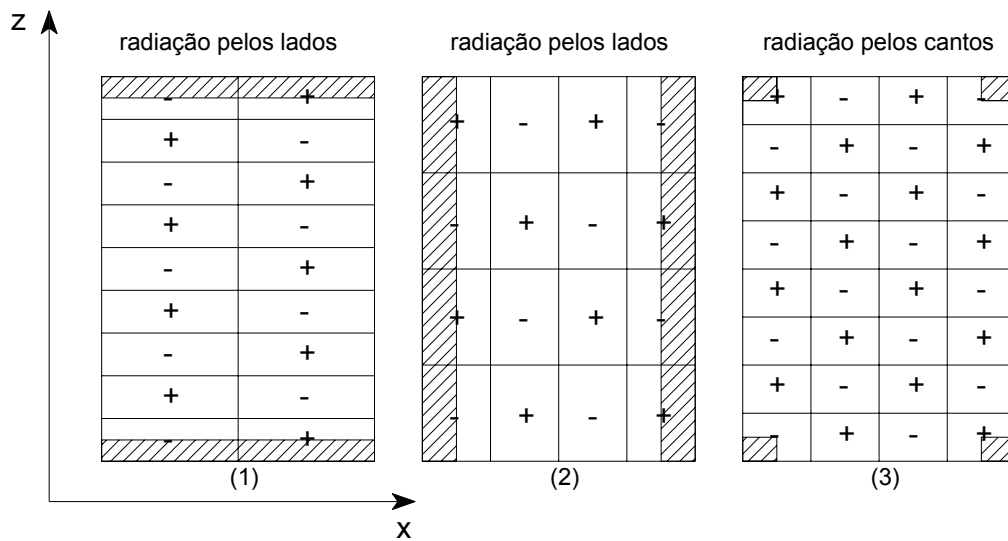


FIGURA 17 – Lados e cantos como fontes de radiação (FAHY, 1987)

A eficiência da radiação em todos os modos de vibração de um painel, em baixas frequências, é menor ou igual à vibração de uma célula isolada. Além disso, é mais eficiente em modos ímpares, com o mesmo comprimento de onda e inversamente proporcional à área do painel.

Na FIG 18, pode-se visualizar o processo de cancelamento ilustrado para o caso unidimensional. O campo de radiação deve estar simetricamente em fase ou anti-simetricamente em fase em relação ao centro do painel. Se as células das extremidades estiverem fora de fase, irão se cancelar para os modos pares e se adicionar para os modos ímpares.

Em altas frequências, quando a frequência natural de uma placa é maior que a frequência de coincidência ($\omega > \omega_c$: $\sigma \rightarrow 1$), a radiação tende a 1, o som é irradiado em um ângulo Φ com a placa ou $\lambda_{ar} = \lambda_B \cdot \text{sen } \Phi$ ou $k_B = k_{ar} \cdot \text{sen } \Phi$, sendo k o número de

³ Frequência na qual a velocidade de propagação da onda sonora no ar coincide com a velocidade de propagação da onda de flexão no material.

ondas $[w/c]$; λ_{ar} o comprimento da onda sonora no ar e λ_B o comprimento da onda sonora no material da placa. Na frequência crítica $\sin \Phi = 1$, ou seja, o som é irradiado paralelo à placa (FAHY, 1987).

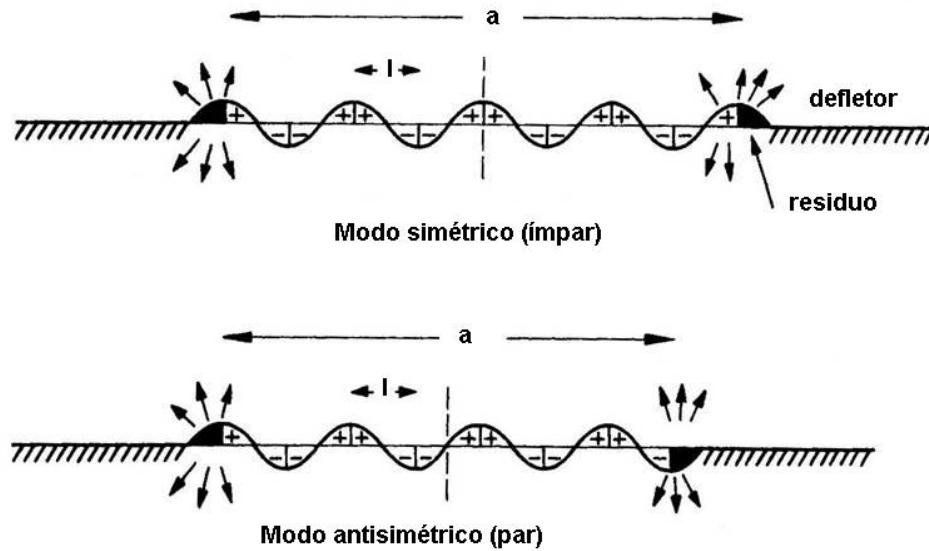


FIGURA 18 – Caso unidimensional: modo simétrico e anti-simétrico (FAHY, 1987).

Segundo CREMER (1988), para painéis com dimensões $a \times b$, a taxa de radiação σ pode ser aproximada pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{Pc_{ar}}{\pi^2 S f_c} \sqrt{\frac{f}{f_c}} \rightarrow f \ll f_c \\ 0,45 \sqrt{\frac{Pf}{f_c}} \rightarrow f = f_c \\ 1 \rightarrow f \gg f_c, \end{cases} \quad (2.12)$$

onde $P = 2(a + b)$ é o perímetro e $S = a \times b$ é a área da placa;

f é a frequência de excitação do painel;

f_c é a frequência crítica;

c_{ar} é a velocidade do som no ar;

Sistemas de placas isotrópicas tipo sanduíche, ou seja, duas placas separadas por uma camada central de baixa rigidez, possuem características de dissipação alteradas pelas

propriedades elásticas e espessura dessas camadas. A rigidez de cisalhamento da camada central é normalmente muito baixa, e nesse caso a propagação das ondas transversais é controlada pela rigidez de flexão de todo o sistema em baixas frequências, pela rigidez de cisalhamento da camada central em frequências intermediárias, e pela rigidez de flexão de cada camada individualmente nas altas frequências. Uma curva típica de dissipação está ilustrada na FIG 19, a qual mostra que a frequência crítica é maior em placas tipo sanduíche que em placas uniformes. Além disso, a eficiência da radiação pode ser reduzida em toda a faixa de frequência. Camadas elásticas podem produzir aumento da ressonância placa – camada – placa, que se não for controlada por um amortecimento apropriado, pode aumentar muito a radiação.

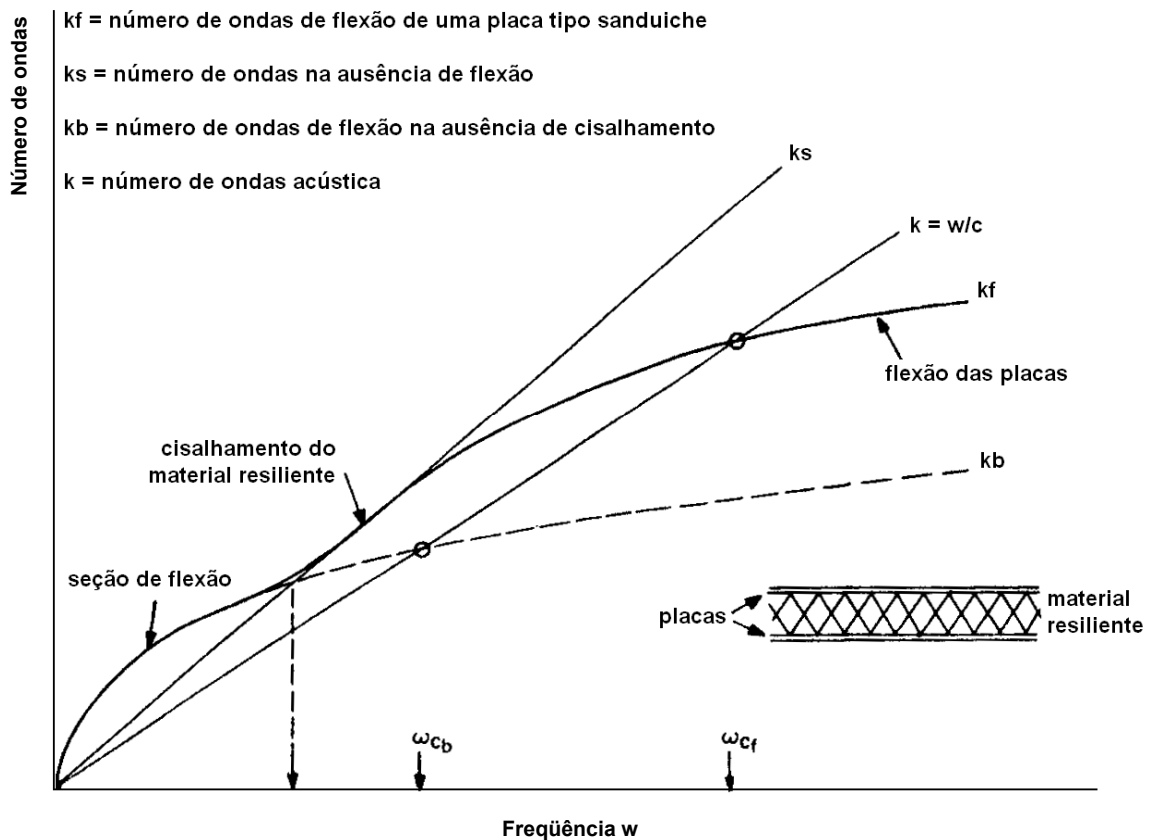


FIGURA 19 – Curva de dissipação para uma placa tipo sanduíche (FAHY, 1987)

2.5. Expressões Analíticas para Predição de Isolação de Ruído de Impacto

Segundo BISTAFA (2006), para lajes de concreto, o nível sonoro normalizado de impacto para frequências acima da frequência crítica independe da frequência em análise. Isto pode ser visualizado na equação seguinte:

$$L_{n\text{banda}} = -30 \log t + \Delta L_{\text{banda}} + 54 \text{dB} \quad (2.13)$$

onde $\Delta L_{\text{banda}} = -1,5 \text{dB}$ para bandas de oitava, $\Delta L_{\text{banda}} = -6,5 \text{dB}$ para bandas de 1/3 oitava, e t é a espessura da laje [m].

Essa equação indica que a duplicação da espessura da laje reduz em 9dB o nível sonoro irradiado para o recinto de baixo. Entretanto, na prática essa alternativa não é adotada, uma vez que ela implica em custos elevados e problemas estruturais na edificação (BISTAFA, 2006).

A FIG 20 apresenta um modelo físico simplificado do sistema de piso flutuante. Trata-se de um sistema massa-mola-amortecedor, em que a massa do sistema é caracterizada pela densidade superficial do contrapiso (m) em $[\text{kg}/\text{m}^2]$, a mola é caracterizada pela rigidez dinâmica do isolador (s') em $[\text{N}/\text{m}^3]$ e o amortecimento é referido pelo atrito interno do material resiliente ou isolador em $[\text{N}/\text{m}^3]$.

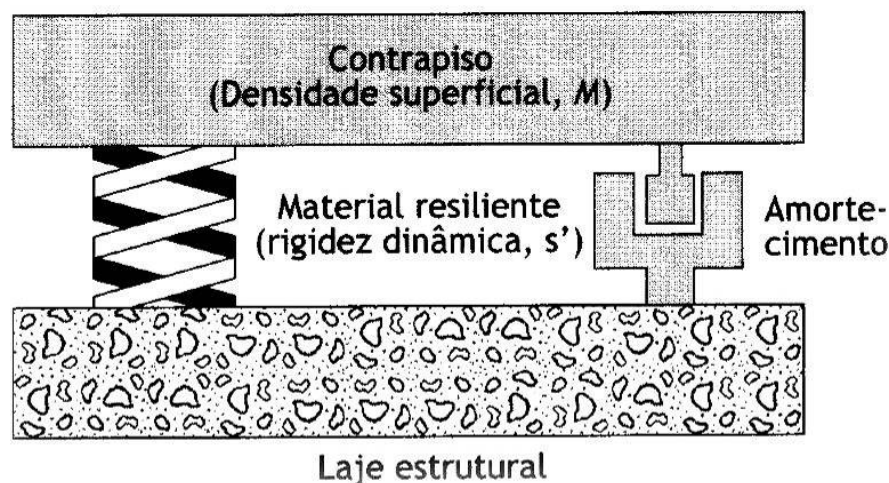


FIGURA 20 – Modelo físico simplificado de um piso flutuante (BISTAFA, 2006).

BISTAFA (2006) apresenta a expressão que determina a frequência de ressonância fundamental (f_1) do sistema de piso flutuante, quando o material resiliente é aplicado em toda a superfície do piso.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.14)$$

onde:

f_1 - frequência de ressonância [Hz];

s' - rigidez dinâmica por unidade de superfície do material elástico [N/m³];

m - massa por unidade de superfície de piso flutuante [kg/m²].

O método experimental para determinação da rigidez dinâmica do isolador (s') está prescrito na norma ISO 9052. A frequência de ressonância (f_0) é aquela cuja amplitude da velocidade de vibração medida com o acelerômetro é máxima (BISTAFA, 2006). Uma vez medida a frequência de ressonância e conforme a Eq. (2.35), a rigidez dinâmica do isolador será:

$$s' = 4\pi^2 m \cdot f_0^2 \quad [\text{N/m}^3 \text{ ou Pa/m}] \quad (2.15)$$

Nas aplicações de controle de ruído, é interessante utilizar com pequenos valores de s' , ou seja, materiais com características mais elásticas possíveis. Do ponto de vista estrutural, é desejável que seja um material capaz de resistir às cargas e à instalação do contrapiso sem fissurar.

Na expressão a seguir apresenta-se outra forma de representar a rigidez dinâmica (PIZZUTTI,1998):

$$s' = \frac{E_{din}}{d} \quad [\text{N/m}^3 \text{ ou Pa/m}] \quad (2.16)$$

onde:

s' - rigidez dinâmica por unidade de superfície do material elástico [N/m³];

E_{din} - módulo de elasticidade dinâmico do material elástico [N/m²];

d - espessura do material elástico [m].

Dessa forma, a Eq (2.17) mostra a expressão do módulo de elasticidade dinâmico do isolador (E_{din}):

$$E_{din} = s' \cdot d \quad [\text{N/m}^2 \text{ ou Pa/m}] \quad (2.17)$$

Quando o material resiliente é aplicado somente nos apoios do piso flutuante determina-se a frequência de ressonância fundamental da seguinte forma (PUJOLLE, 1978):

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s + s'}{m}} \quad (2.18)$$

onde:

f_1 - frequência de ressonância [Hz];

s' - rigidez dinâmica por unidade de superfície do material elástico [N/m^3];

s - rigidez dinâmica da camada de ar [N/m^3];

m - massa por unidade de superfície de piso flutuante [kg/m^2].

Sendo que:

$$s = \frac{\rho \cdot c^2}{d} \quad (2.19)$$

onde:

ρ - densidade (massa volumétrica) = 1,202 kg/m^3 a 20° C;

c - velocidade do som no ar = 343 m/s a 20° C;

d - espessura da camada de ar [m].

Verifica-se que para se obter frequência de ressonância em baixas frequências, deve-se trabalhar com a rigidez dinâmica s' do material. Quanto menor a rigidez dinâmica, menor a frequência de ressonância do sistema. A FIG 21 compara curvas típicas de isolamento a ruído de impacto, considerando a laje estrutural sem revestimento, um piso flutuante e a combinação de piso flutuante revestido com material elástico (SANCHO et al., 1982).

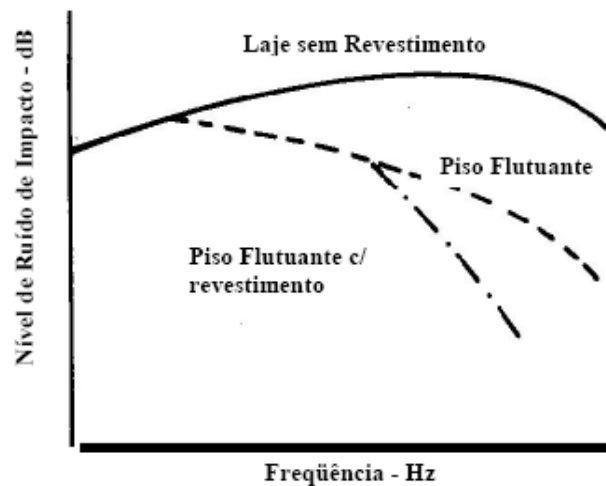


FIGURA 21 – Curvas típicas de isolamento de ruído de impacto (SANCHO et al., 1982).

A expressão analítica que determina a capacidade de isolamento de impactos dos sistemas de piso flutuante estudados é dada pela *redução do nível sonoro normalizado de impacto* (ΔL_n). Esta expressão é fundamental para realizar comparação entre os valores analíticos e os experimentais da atenuação do ruído estrutural.

De acordo com BISTAFA (2006), a *redução do nível sonoro normalizado de impacto* (ΔL_n), refere-se à diferença entre o nível sonoro medido na sala de recepção, com a laje estrutural sem revestimento e contrapiso, L_n , e o nível sonoro medido na sala de recepção após a montagem do piso flutuante sobre a laje, L'_n .

$$\Delta L_n = L_n - L'_n \quad (2.20)$$

A redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n) pode ser expressa também pela seguinte equação (CREMER, 1988):

$$\Delta L_n = 40 \log \frac{f}{f_1} \quad (2.21)$$

onde f_1 é a frequência natural do sistema contrapiso-isolador-laje, em Hertz e f é a frequência da banda de oitava em análise.

CREMER (1988) ressalta que essa equação expressa melhores estimativas na faixa de frequência entre $f_1 < f < 4f_1$.

Além disso, CREMER (1988) propôs a Eq (2.22) para considerar a influência da massa do martelo, $m_0=500\text{g}$, no ensaio padrão de ruído de impacto de piso. Segundo ele, a massa do martelo não comprometeria os resultados medidos se sua impedância, $j2\pi fm_0$, fosse pequena quando comparada à impedância de excitação pontual da placa, Z , a qual representa a resistência ao movimento no ponto de impacto da placa (contrapiso). Esta condição é normalmente satisfeita para a maioria das frequências de interesse. Entretanto, para os casos com contrapisos de pisos flutuantes leves, a impedância da massa do martelo torna-se significativa nas frequências acima da frequência limite f_2 , sendo assim definida:

$$f_2 = \frac{Z_1}{2\pi m_0} \quad [\text{rad/s}] \quad (2.22)$$

onde, Z_1 é a impedância da placa no ponto de excitação.

A Eq (2.23) permite melhorar os resultados em relação à Eq (2.21), principalmente nas frequências mais altas (CREMER, 1988).

$$\Delta L_n = \left[40 \log \frac{f}{f_1} + 10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_2} \right)^2 \right) \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.23)$$

onde f_2 é a frequência limite, relacionada à impedância da massa do martelo.

Por exemplo, onde o contrapiso do piso flutuante é de madeira com 1,2cm de espessura, para o qual a frequência limite f_2 é de 223Hz, de acordo com a Eq (2.23), o valor da redução do nível sonoro ΔL_n seria de 40dB.

Segundo MACHADO (2003), a impedância da placa no ponto de excitação, Z_1 , pode ser obtida pela equação abaixo:

$$Z_1 = \frac{16\pi f m''}{k^2} \quad [\text{kg/ms}] \quad (2.24)$$

onde:

k – número de onda - $k = \frac{2\pi f}{c_B}$;

m'' – massa do contrapiso por unidade de área;

c_B – constante de velocidade da onda de flexão na placa, expressa por:

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B'}{m''} \sqrt{2\pi f}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.25)$$

onde:

f - frequência de estudo, em Hertz, para cada terço de oitava;

B' – rigidez de flexão da placa por unidade de largura, expressa por:

$$B' = \frac{EI'}{(1-\nu^2)} = \frac{h^3}{12} \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad [\text{N.m}] \quad (2.26)$$

onde:

I' – momento de inércia por unidade de largura para placas, $I' = h^3/12$;

E – módulo de elasticidade da placa (contrapiso);

ν – coeficiente de Poisson;

h – espessura da placa.

A FIG 22 apresenta uma comparação entre resultados analíticos, segundo Eq (2.13), e experimentais, com a máquina de ruído de impacto padronizada e com sapatos de salto alto, de um piso flutuante composto por laje de 10cm, material resiliente de 1,4cm e contrapiso de 4cm. Como uma laje de concreto maciça de 10cm de espessura tem frequência crítica em torno de 190Hz, então, segundo a Eq. (2.13), o nível sonoro normalizado de impacto (L_n), independente da frequência é de 77,5dB (BISTAFA, 2006).

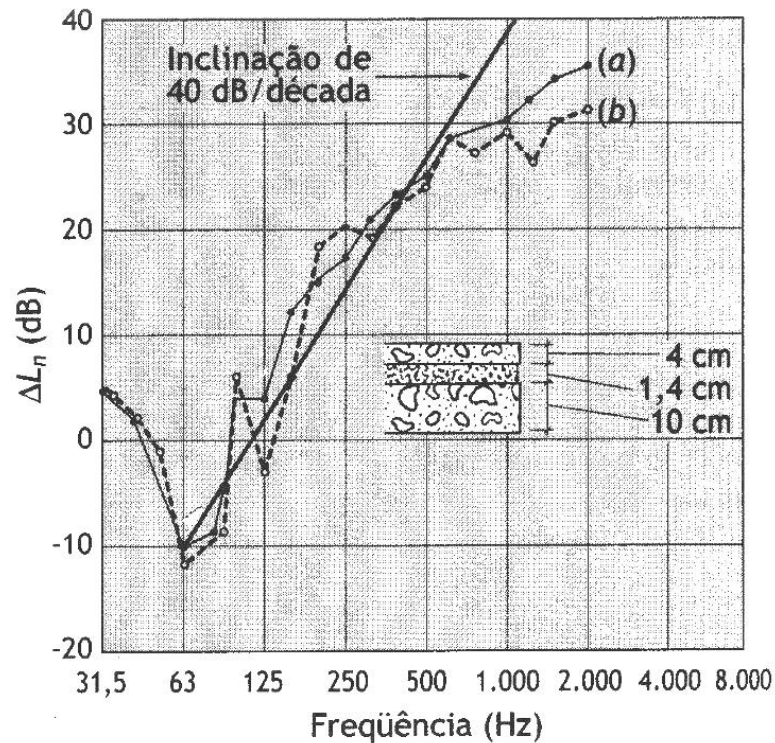


FIGURA 22 – Redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n) para piso flutuante excitado com (a) máquina de ruído de impacto padronizada e (b) sapatos de salto alto (BISTAFA, 2006).

Nesta figura observa-se a redução negativa (na realidade uma amplificação do nível sonoro) nas frequências próximas à frequência de ressonância. Nas frequências inferiores à frequência de ressonância, a laje e o piso flutuante movem-se solidariamente e em fase. Nesta faixa de frequência, a melhoria do isolamento não é tão expressiva, pois o piso flutuante agrega uma massa relativamente pequena em relação à laje estrutural. Nas vizinhanças de f_1 , o piso flutuante tem desempenho menos favorável que a laje sem piso flutuante, já que a isolação depende do amortecimento interno do material do isolador. Acima de f_1 , o desacoplamento do piso flutuante da laje estrutural aumenta, assim como a isolação dos impactos.

A FIG 23 mostra duas simples comparações entre o ΔL_n calculado, segundo a Equação 46, e o medido (CREMER, 1988). A FIG 23 (a) refere-se a um piso flutuante com contrapiso de concreto de 3,5cm sobre manta de lã de vidro e laje de concreto de 13cm. A FIG 23 (b) refere-se a um piso flutuante com contrapiso de asfalto de 2,5cm sobre manta de lã de vidro e laje nervurada de 20cm com capa de concreto de 5cm. Observa-

se que a configuração (b) teve um melhor desempenho, pois além do asfalto ter amortecimento maior que o do concreto, as ondas refletidas nas extremidades têm menor efeito e as refletidas no interior desaparecem.

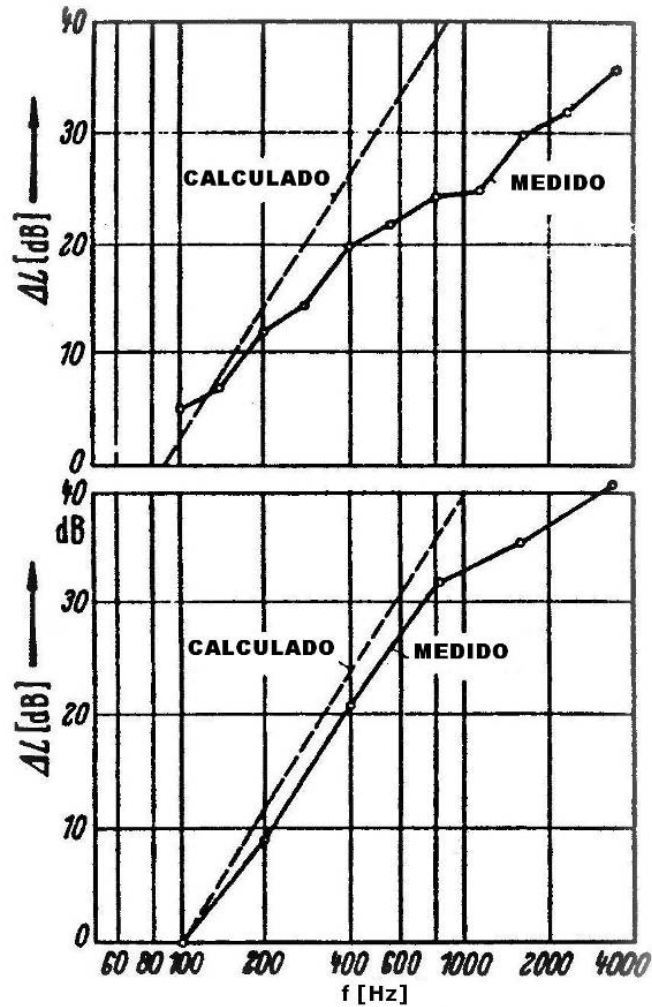


FIGURA 23 – Redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n) para piso flutuante excitado sobre (a) contrapiso de concreto de 3,5cm sobre manta de lã de vidro e laje de concreto de 13cm e (b) contrapiso de asfalto de 2,5cm sobre manta de lã de vidro e laje nervurada de 20cm com capa de concreto de 5cm (CREMER, 1988).

2.6. Normalização

O desenvolvimento do presente trabalho buscou estar em conformidade com as seguintes normas:

2.6.1. ISO 140-7: 1998 - Medições de campo para isolamento de ruído de impacto em pisos

A norma ISO 140-7: 1998 – *Field measurements of impact sound insulation of floors* descreve o método de medição de isolamento de ruído de impacto, usando a máquina de ruído de impacto padrão, especificada no anexo A da norma.

Segundo a ISO 140-7, o ruído de impacto deve ser gerado em pelo menos 4 diferentes posições aleatoriamente distribuídas no piso de teste. A distância da máquina de ruído em relação às paredes do recinto deve ser de pelo menos 0,5m. As posições de microfones no pavimento inferior devem ser no mínimo de 0,7m entre si, 0,5m entre qualquer posição de microfone e os envoltórios do recinto e 1,0m entre qualquer posição de microfone e o piso superior que está sendo excitado pela máquina de ruído. Um mínimo de 4 posições de microfone deve ser utilizado, distribuídas uniformemente dentro do espaço permitido para medição do recinto. O número mínimo de medições usando posições fixas de microfones é seis, e uma combinação de pelo menos quatro posições de microfones com pelo menos quatro posições da máquina de ruído deve ser utilizada. O nível de pressão sonora das diferentes posições de microfone deve ser a média logarítmica da energia para todas as posições da máquina de ruído.

$$L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.27)$$

Pela norma, as características do isolamento dos elementos construtivos horizontais, devem ser expressas em termos de Nível de Pressão Sonora de Impacto, L_i (Nível de Ruído de Impacto). Este é definido como o nível de pressão sonora médio para uma determinada frequência, medido no recinto receptor quando o elemento horizontal é excitado com uma fonte padrão. Define-se o Nível de Ruído de Impacto Normalizado, L_n , como:

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad [\text{dB}] \quad (2.28)$$

onde:

L_n - Nível de Ruído de Impacto Normalizado [dB];

L_i - Nível de Ruído de Impacto [dB];

A - Absorção Acústica da Sala Receptora [m^2];

A_0 - Absorção Acústica de referência cujo valor é 10 m^2 .

Pode também utilizar o Nível de Ruído de Impacto Padronizado, L_{nT} , como:

$$L_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [\text{dB}] \quad (2.29)$$

onde:

L_{nT} - Nível de Ruído de Impacto Padronizado [dB];

L_i - Nível de Ruído de Impacto [dB];

T - Tempo de reverberação do ambiente receptor [s];

T_0 - Tempo de reverberação de referência = 0,5 s.

Ressalta-se que em certos casos é necessário realizar a correção do ruído de fundo. O nível do ruído de fundo deve estar a pelo menos 6dB (e preferencialmente mais que 10dB) abaixo do nível da combinação do sinal emitido com o ruído de fundo. Se a diferença estiver entre 6dB e 10dB, a correção deve ser realizada de acordo com a seguinte Eq (2.30):

$$L = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.30)$$

onde:

L - Nível do sinal ajustado [dB];

L_{sb} - Nível da combinação do sinal com o ruído de fundo [dB];

L_b - Nível de ruído de fundo [dB];

Se a diferença for menor ou igual a 6dB em qualquer banda de frequência, usar a correção de 1,3dB.

Em conformidade com o anexo A da ISO 140-7, a máquina de ruído de impacto deve conter cinco pesos alinhados. A distância entre o centro dos suportes da máquina de

ruído de impacto e o centro dos pesos deve ser de pelo menos 100mm. Cada peso, que impacta com o piso, deve ter massa efetiva de 500g e permitir queda livre de 40mm de altura, na velocidade de 0,033m/s. A direção da queda dos pesos deve ser perpendicular à superfície de teste. O peso que impacta a superfície de teste deve ter o formato cilíndrico com um diâmetro de $(30\pm 0,2)$ mm e a superfície de impacto do peso deve ser constituída de aço e ter o formato esférico com raio de curvatura de (500 ± 100) mm.

2.6.2. ISO 140-4: 1998 – Medições de campo para isolamento de ruído aéreo entre ambientes

A norma ISO 140-4: 1998 – *Field measurements of airborne sound insulation between rooms* descreve o método de medição das propriedades de isolamento de ruído aéreo de divisórias (paredes, pisos e portas) entre dois ambientes submetidos a um campo sonoro difuso para determinar a proteção sonora necessária aos usuários da edificação. No presente trabalho, ocorreram medições das propriedades de isolamento de ruído aéreo do piso de ensaio.

A fonte sonora deve ser posicionada em pelo menos dois locais no ambiente superior. No ambiente inferior, no mínimo cinco posições de microfone devem ser distribuídas espacialmente no recinto, resultando em dez medições. As posições de microfone devem estar afastadas a pelo menos 0,5m das superfícies do recinto, 0,7m entre posições de microfone e 1m entre a fonte e qualquer posição de microfone. A propriedade de isolamento de uma divisória será obtida com a diferença entre a média aritmética dos níveis de pressão sonora dos diversos pontos de medição do ambiente com a fonte e a do ambiente receptor (ver Equação 2.2 página 10).

O nível de pressão sonora no ambiente receptor deve ser pelo menos 10dB maior que o ruído de fundo para cada banda de frequência.

2.6.3. ISO 354: 2003 – Medição da absorção sonora em ambiente reverberante

A norma ISO 354: 2003 – *Measurement of sound absorption in a reverberation room* descreve o procedimento de medição da absorção sonora em ambiente reverberante.

Quando uma fonte sonora opera em ambientes fechados, o nível do som aumenta devido a presença do campo reverberante em seu interior. O decaimento do som

reverberante quando a fonte é interrompida, depende das características de absorção sonora das superfícies de contorno e dos objetos dentro desse recinto. O tempo de reverberação é o tempo requerido para o decaimento do nível de pressão sonora em 60dB, depois de cessada a fonte sonora.

No procedimento de medições em um ambiente reverberante, a resposta impulsiva pode ser medida com uma fonte sonora impulsiva como um tiro de pistola, estouro de balão ou qualquer outra fonte que produza um impulso com energia suficiente para excitar todas as bandas de frequência. As medições devem ser realizadas em bandas de terças de oitava, na faixa de frequência de 100Hz a 5000Hz.

O equipamento receptor deve consistir em um ou mais microfones com amplificadores, filtros e sistema de medição para tempo de reverberação. Os registros devem ser armazenados em pelo menos três posições de microfones. Apenas um microfone deve ser utilizado em cada tempo. O microfone deve estar a pelo menos 1m da superfície testada, 1m das demais superfícies ou difusores do ambiente e 2m da fonte sonora. O sistema de registro deve conter equipamento adequado para determinar a curva de decaimento do tempo de reverberação correspondente.

2.6.4. ISO 717-2: 1996 – Isolamento de ruído de impacto

A norma ISO 717-2: 1996 – “*Impact Sound Insulation*” descreve o método de obtenção do isolamento do ruído de impacto, o nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado (L'_{nw}).

De acordo com a norma ISO 717-2, primeiramente obtém-se o gráfico com os dados do nível de pressão sonora de impacto normalizado (L'_n), em bandas de terças de oitava (100Hz a 3150Hz), em relação à frequência. A curva de referência de ruído de impacto (FIG 24) é comparada com os dados medidos, movimentando-a verticalmente de modo que a soma dos valores desfavoráveis (valores acima da curva de referência) não exceda 32dB. Quando a curva estiver posicionada no ponto mais alto, de acordo com os critérios citados, o nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado (L'_{nw}) é o valor no ponto onde a curva de referência corta a linha de frequência de 500Hz. A FIG 25 mostra um exemplo de como encontrar o L'_{nw} .

O valor de L'_{nw} é adequado para caracterizar o ruído de impacto proveniente do

caminhar de pessoas, por exemplo, sobre pisos de madeira ou concreto com acabamento em carpete ou no caso de piso flutuante. Entretanto, o valor de L'_{nw} não leva em consideração os picos dos níveis de ruído nas baixas frequências. Dessa forma, o termo de adaptação C1 foi criado, para levar esse efeito em consideração, substituindo a regra do 8dB utilizado na primeira edição da norma. O termo C1 é calculado pela Eq. (2.31):

$$C_1 = 10 \log \sum_{i=1}^k 10^{L_i/10} - 15 - L'_{nw} \quad (2.31)$$

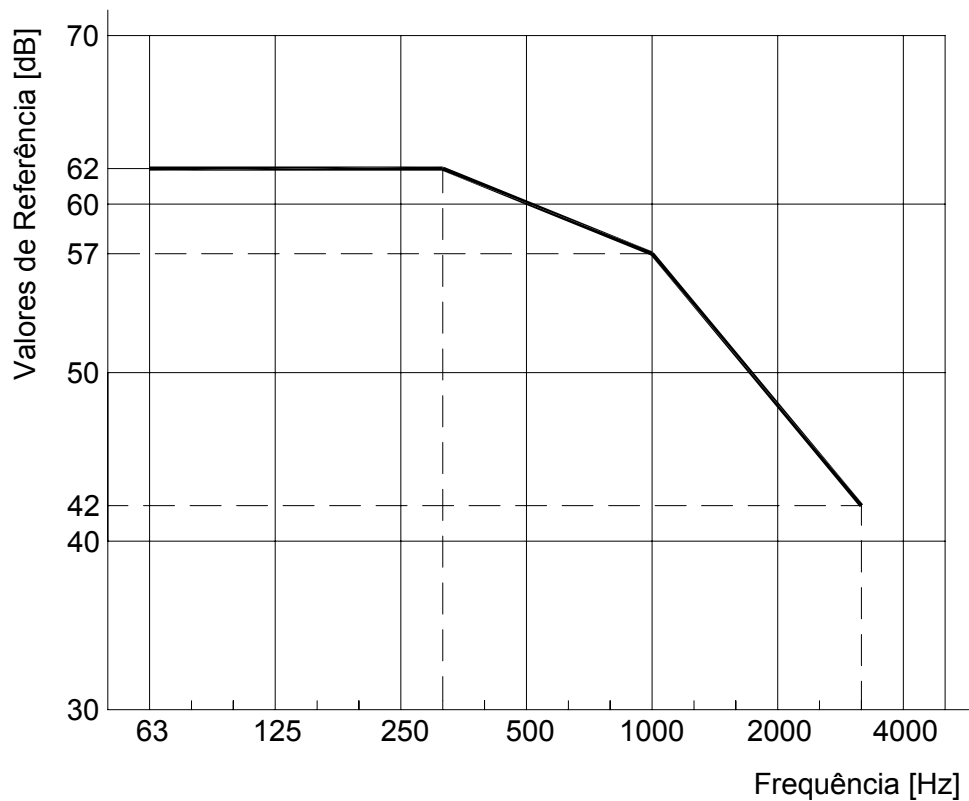
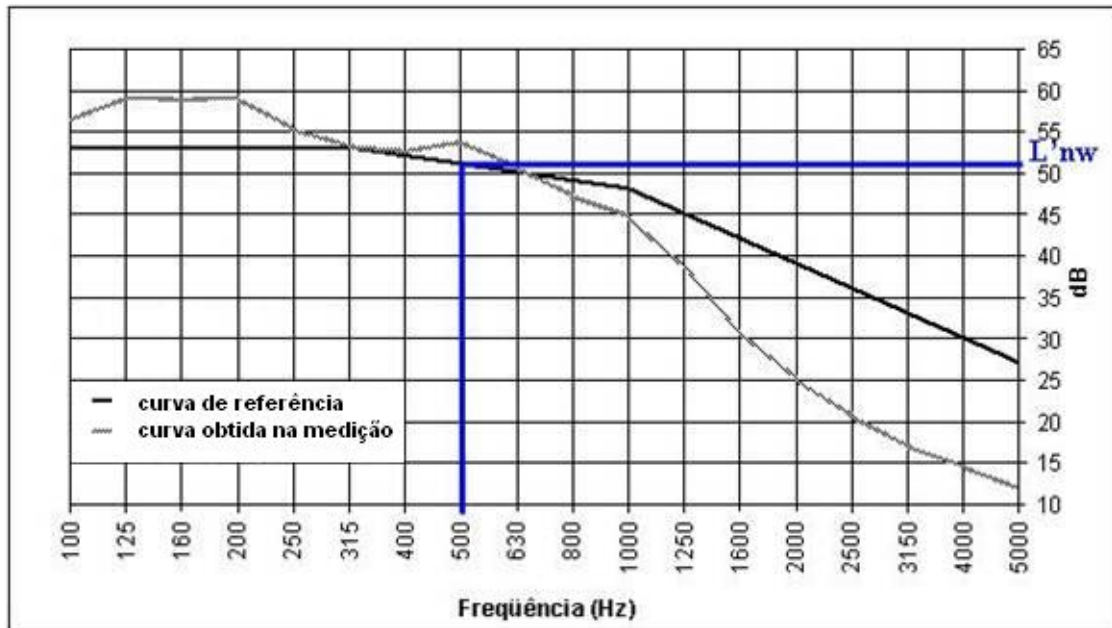


FIGURA 24 – Curva dos valores de referência de ruído de impacto, bandas de terço de oitava.

FIGURA 25 – Exemplo de como encontrar L'_{nw} .

2.6.5. ASTM E989: 1989 – Classificação padrão para determinação da classe de isolamento de impacto – CII

A norma ASTM E 989: 1989 – *Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class – IIC* determina a Classificação Padrão para Determinação da Classe de Isolamento de Impacto.

A determinação da Classe de Isolamento de Impacto (CII) é aplicável apenas em bandas de terça de oitava (100Hz a 3150Hz), para dados de ruído de impacto, usando a máquina de ruído de impacto padrão sobre sistemas de piso flutuante. Essa classificação pode ser usada em dados obtidos em laboratório ou em campo.

Quanto maior o valor de CII, maior o isolamento de ruído de impacto do piso submetido ao ensaio com a máquina de ruído de impacto padrão.

Para determinar o CII de um sistema de piso flutuante, os níveis de pressão sonora de impacto normalizado de um modelo são impressos num gráfico. A classe de isolamento de impacto é determinada, movimentando-se verticalmente a curva de referência de CII em relação a esses níveis com as seguintes condições: a soma dos desvios acima da curva de referência não pode exceder a 32dB; e o desvio máximo em cada frequência não pode exceder a 8dB. O CII é o resultado da subtração de 110 e o valor da curva de

referência na frequência de 500Hz (FIG 26).

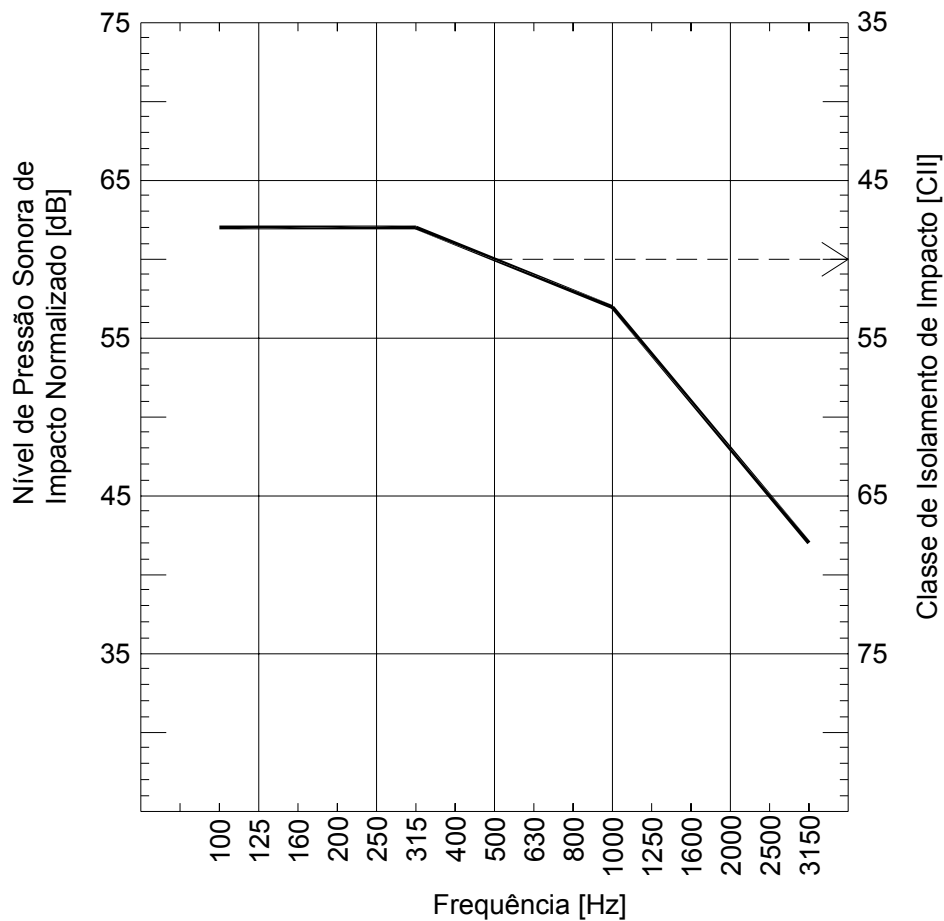


FIGURA 26 – Curva de referência, segundo ASTM E989:1989

A *Uniform Building Code* (UBC) e a *State of California* estabeleceram uma classificação mínima de $CII^4 = 50$ em laboratório e $FCII^5 = 45$ em campo para residências com múltiplos pavimentos. Nessa classificação mínima, o ruído provocado pelo caminhar de pessoas sobre um piso é claramente audível no piso abaixo deste, e também é possível seguir o progresso do caminhar em torno do ambiente. Assim, essa classificação mínima não representa um bom sistema de pisos para edificações residenciais. Apenas quando a classificação do CII for igual ou superior a 65, os impactos ficam inaudíveis.

⁴ CII – Classe de Isolamento de Impacto.

⁵ FCII - Classe de Isolamento de Impacto obtida em campo, considerando a presença de ruídos de flanco.

2.6.6. NBR 15575-3: 2008 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos.

A norma da ABNT NBR 15575-3: 2008 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos, determina critérios para isolamento de ruído aéreo e de impacto de pisos.

Esta norma segue os procedimentos de ensaios e análise de dados das normas ISO. Abaixo apresenta-se os critérios para isolamento de ruído aéreo e de impacto de pisos (TABS 02 e 03).

TABELA 02 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,w}$, para ensaios de campo e R_w para ensaios em laboratório.

Elemento	Campo $L'_{nT,w}$ [dB]	Laboratório R_w [dB]	Nível de Desempenho
Piso de unidade habitacional, posicionado sobre áreas comuns, como corredores	35	40	M
	40 a 45	45 a 50	I
	> 45	> 50	S
Piso separando unidades habitacionais autônomas (piso separando unidades habitacionais em pavimentos distintos)	40	45	M
	45 a 50	50 a 55	I
	> 50	> 55	S

TABELA 03 – Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, $L'_{nT,w}$, para ensaios de campo

Elemento	$L'_{nT,w}$ [dB]	Nível de desempenho
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, sem tratamento acústico	< 80*	M (Mínimo)
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, com tratamento acústico	55 a 65	I (Intermediário)
	< 55	S (Superior)

* O valor mínimo exigido corresponde a valores representativos de ensaios realizados em pisos de concreto maciço, com espessura de 10cm a 12cm, sem acabamento.

3.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, apresenta-se uma revisão bibliográfica, na qual realizou-se levantamento dos trabalhos relacionados ao ruído de impacto de pisos dos últimos cinco anos, e também alguns julgados relevantes, mesmo sendo mais antigos. Os trabalhos foram resumidos e subdivididos na seguintes áreas: procedimentos de medição de isolamento de ruído de impacto; projeto e instalação dos pisos flutuantes e forros suspensos; e desempenho de materiais utilizados nos sistemas de piso flutuante.

Em 1963, HECKL e RATHE encontrou uma relação entre a perda por transmissão e o isolamento de ruído de impacto provido por estruturas de piso. Com a aplicação do princípio da reciprocidade, a relação é derivada para pisos com superfícies com alta rigidez, as quais tornam possível estimar o ruído de impacto da perda por transmissão ou vice-versa.

VÉR, em 1970, descreve em seu trabalho um procedimento para o cálculo do nível de ruído de impacto de um piso estrutural de alta rigidez, quando excitado pela máquina de ruído de impacto padrão. Os cálculos mostraram que há um aumento do isolamento de ruído de impacto quando se adiciona camadas com superfícies elásticas (ou pisos flutuantes com superfícies de alta impedância) ao piso estrutural.

No ano de 1988, CREMER analisou espectros de ruído gerados pela máquina de ruído de impacto padrão atuando num piso homogêneo de alta impedância. Ele assumiu que o impacto é perfeitamente elástico e que os resultados foram satisfatórios para muitas frequências.

Já em 1998, SHI *et al.* criticaram as medições em pisos de madeira com a máquina de ruído de impacto padrão, uma vez que ela não simula verdadeiramente o caminhar

humano, principalmente em baixas frequências. Alcançaram resultados mais próximos da realidade quando utilizaram a *sand ball* como fonte de ruído de impacto. Este sistema é constituído por uma bola de areia, que é solta de certa altura no piso de ensaio.

Nos últimos cinco anos, numerosos trabalhos ressaltaram a importância do isolamento de ruído de impacto. Dessa forma, houve necessidade de classificá-los em grupos de temas semelhantes, tais como: procedimentos de medição, projeto e instalação, materiais e predição de ruído de impacto com comparação entre resultados analíticos e experimentais.

Alguns trabalhos abordaram procedimentos de medição de isolamento de ruído de impacto.

WARNOCK (2002) analisou as perspectivas de um procedimento de medição da ASTM, para avaliação do revestimento dos pisos em sistemas de pisos flutuantes.

FUCHS *et al.* (2003) criaram outros procedimentos de medição de isolamento de ruído aéreo e de impacto. Para o ruído de impacto, a fonte é um único peso rotatório, constituído por material sintético, a 120rpm, com 200g de massa. Ela é aplicada no centro do ambiente da fonte, sendo que o nível de ruído no ambiente receptor não deve exceder $60+3$ dB(A).

KOGA *et al.* (2006) estudaram métodos de predição do ruído de impacto de pisos, uma vez que os praticados atualmente foram estabelecidos na década de 70. HIRAMITSU *et al.* (2006) descreveram a norma japonesa de procedimento de medição de isolamento de ruído de impacto - JIS A 1418 - e estudos de casos relacionados à norma, de fontes de impacto leves e pesadas.

Outros trabalhos abordaram os cuidados com projeto e instalação dos pisos flutuantes e forros suspensos.

SEMPRINI *et al.* (2004) investigaram a influência das transmissões de ruído por frestas acústicas nos níveis de isolamento de ruído de impacto em pisos padronizados com e sem camada resiliente. As medições foram desenvolvidas com piso de concreto de 14cm de espessura em duas diferentes situações: conectado com o ambiente receptor em dois lados, e depois com todos os quatro lados. Verificaram que o piso com camada

resiliente e conectado com o ambiente receptor em todos os lados obteve melhor desempenho no isolamento de ruído de impacto.

NASH (2006) estudaram os sistemas piso-forro comumente utilizados nos edifícios residenciais da América do Norte, com estruturas leves de pisos, envolvendo conexões de madeira e perfis formados a frio, e forro de gesso. Ressaltaram a importância de diversos cuidados na montagem do sistema do forro pois, se instalado incorretamente, podem aparecer sérios problemas no isolamento de baixa frequência. Obtiveram bons resultados no isolamento de ruído com sistemas de forro com amortecedores resilientes em forma de Z.

QUIRT *et al.* (2006) desenvolveram um estudo completo sobre transmissões de ruído por frestas acústicas, entre juntas de paredes e pisos, em edificações com múltiplos pavimentos. Os resultados indicaram que se não existir um bom acabamento nas frestas do piso, o isolamento de ruído tanto aéreo quanto de impacto poderá ser comprometido.

Há também trabalhos apresentando estudos sobre o desempenho de materiais utilizados nos sistemas de piso flutuante.

RUSHFORTH *et al.* (2005) analisaram o isolamento de ruído de impacto e as propriedades visco-elásticas de materiais manufaturados com a reciclagem de resíduos de carpete, e compararam seu desempenho com os materiais utilizados comercialmente. Desenvolveram uma formulação para produzir amostras desses materiais com otimização no isolamento do ruído de impacto. Concluíram que essas amostras foram mais eficazes que os materiais utilizados comercialmente.

PETTYJOHN *et al.* (2006) estudou a influência de estruturas leves em edifícios de escritório, nos níveis de vibração ocorridos durante o caminhar de pessoas e na operação de equipamentos mecânicos. Verificou-se que as configurações de sistemas piso-forro neste tipo de estruturas, normalmente, resolvem os problemas de ruídos aéreos, entretanto estão sujeitos a vibrações estruturais com amplitudes elevadas.

HALE *et al.* (2006) realizaram estudos comparativos entre os resultados de numerosos ensaios de sistemas de pisos de edifícios de múltiplos pavimentos. Os resultados mostraram que a combinação de materiais resilientes com superfícies de alta rigidez, substituindo os carpetes normalmente utilizados, apresentaram melhor desempenho no isolamento do ruído.

JEON *et al.* (2006) analisaram o efeito de materiais amortecedores no isolamento de ruído de impacto de pisos de edifícios de múltiplos pavimentos. Observaram que os materiais resilientes comumente utilizados em pisos flutuantes amplificam os ruídos nas frequências abaixo de 100Hz. Para solucionar este problema, sugerem o uso de um material amortecedor, como um líquido visco-elástico, incorporado na estrutura, uma vez que absorve mais energia que os materiais tradicionais.

LOVERDE *et al.* (2006) realizaram estudos de casos em estruturas leves de madeira e aço para melhorar o isolamento de ruído de impacto, principalmente em baixas frequências. Utilizaram os procedimentos de ensaio da norma ASTM com a máquina de ruído de impacto padrão, entretanto estudaram a faixa de frequência para acima de 20Hz, em terças de oitava, ao invés de acima de 100Hz como recomendado na norma. Obtiveram resultados significativos, principalmente na faixa de frequência de 50-80Hz.

Certos trabalhos estudaram a predição do ruído de impacto comparando resultados analíticos e experimentais.

TADEU *et al.* (2007) usaram soluções analíticas para predição do isolamento de ruído aéreo e de impacto. O isolamento de ruído de impacto foi calculado para painéis simples e para sistemas de camadas suspensas, e a comprovação foi desenvolvida com resultados experimentais. As respostas analíticas foram similares às experimentais. A maior diferença ocorreu em baixas frequências na faixa do efeito de coincidência. A aplicabilidade das soluções analíticas para a previsão do comportamento acústico de combinações de camadas estruturais simples com forros suspensos foi discutida. Foi mostrado que o modelo proposto é capaz de captar todo o fenômeno físico acústico envolvido na previsão do comportamento acústico de sistemas com extensões infinitas, tais como: o fenômeno da ressonância massa-ar-massa, o efeito de coincidência associado com a propagação de ondas em painéis individuais, a ressonância ocorrida no interior da camada de ar e o efeito que ocorre quando a camada de ar é preenchida com lã mineral.

No Brasil, constatou-se a predominância de pesquisas relacionadas ao desempenho de materiais utilizados nos sistemas de pisos flutuantes e forros suspensos.

BRONDANI (1999) analisou o desempenho acústico dos pisos de cerâmica e madeira submetidos a ruídos de impacto, utilizando-se diferentes materiais como "recheios

resilientes". Foram analisados os materiais existentes no mercado brasileiro, bem como materiais alternativos que apresentassem potencial para o amortecimento de ruído de impacto. Utilizou-se o processo convencional da construção civil, laje de concreto armado, e os ensaios foram realizados *in situ*. As alternativas propostas foram comparadas, observando-se parâmetros determinados pelas normas.

HAX (2002) buscou uma alternativa para a reciclagem dos resíduos sólidos oriundos das indústrias calçadistas, especificamente o copolímero Poli-Etileno, Co-Vinil, Acetato (EVA), utilizado na fabricação de solas, entre-solas e palmilhas dos calçados. Foi verificado o potencial do EVA granulado no isolamento de ruído de impacto nas edificações. O EVA granulado foi moldado em placas, com diversas espessuras e composições, que foram testadas em laboratório para a verificação de desempenho. Desta forma, comparou-se o desempenho das diferentes placas de material alternativo, visando determinar a composição que oferece o melhor resultado para o isolamento de ruído de impacto nas edificações. Entre todas as amostras ensaiadas, para este sistema de piso flutuante, verificou-se que as Amostras de EVA Granulado e de EVA com Resina Sintética obtiveram os melhores desempenhos. Ambas as amostras, com espessura das placas de 25 mm, apresentaram ganhos de isolamento na ordem de 14 dB em relação à amostra referencial. Salienta-se que as duas amostras obtiveram ganhos de isolamento superiores à lã de vidro ($e=25\text{mm}/\text{densidade}=100\text{kg/m}^3$), nesta composição de piso flutuante, com uma diferença de 2 dB entre elas.

CONRAD (2002) objetivou verificar o desempenho, quanto ao isolamento do ruído de impacto, de diversos materiais normalmente usados como revestimentos de pisos na indústria da construção civil e fazer um estudo comparativo entre os mesmos. Os ensaios foram realizados em câmaras para medir ruído de impacto do Laboratório de Termo-acústica (LaTA) da UFSM, conforme metodologia especificada na Norma Internacional ISO 140/VII. Foram ensaiadas amostras de revestimentos para pisos em borracha, materiais sintéticos, carpetes em várias espessuras, com e sem o uso de base isolante para carpetes, piso laminado de madeira com e sem o uso de tapetes. A análise dos resultados obtidos nos ensaios foi feita agrupando-se os materiais com características semelhantes. Verificou-se que os materiais que apresentaram melhores resultados no isolamento ao ruído de impacto nem sempre foram os de maior espessura e sim os mais resilientes.

MACHADO (2003) analisou o ruído estrutural e os níveis de aceleração provenientes de excitações causadas pelo caminhar de pessoas em piso de laje construída no sistema *slim floor*. Foram estudadas configurações de pisos flutuantes usando manta resiliente de polietileno nas espessuras de 5, 10 e 20mm. Constatou-se que a manta de 5mm obteve um resultado inexpressivo e a de 10mm apresenta a melhor relação custo-benefício, já que obteve um desempenho próximo à manta de 20mm, em relação ao isolamento de ruído de impacto.

4.

MATERIAIS E MÉTODOS

As medições de ruído de impacto de pisos para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas conforme recomendações das Normas ISO 140-7: 1998 *Field measurements of impact sound insulation of floors*, ISO 140-4:1998 *Field measurements of airborne sound insulation between rooms*, ISO 717-2: 1996 *Impact Sound Insulation*, ISO 354: 2003 *Measurement of sound absorption in a reverberation room* e ASTM E 989:1989 *Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class – IIC*.

4.1. Objeto de Estudo

O estudo de caso considerado neste trabalho foi referente à avaliação da isolação do ruído de impacto de pisos, de diversos sistemas construtivos, compostos por materiais usualmente utilizados na construção civil nacional, entre duas suítes sobrepostas de um edifício residencial.

No desenvolvimento dos estudos de casos foram considerados diversos sistemas de pisos flutuantes, os quais foram ensaiados em duas suítes sobrepostas, 11º e 12º andar, de um edifício residencial, localizado no Bairro Belvedere, em Belo Horizonte/MG.

O piso de ensaio, situado na suíte 1 do 12º andar (suíte superior), possui área de $12,94\text{m}^2$ (FIG 27). As diversas configurações ensaiadas foram caracterizadas por sistemas de multicamadas, constituídas por assoalho, contrapiso, material resiliente e laje (FIG 28). As medições acústicas foram realizadas na suíte 1 do 11º andar, ambiente verticalmente abaixo do piso de ensaio (FIG 29). Este ambiente possui $12,94\text{m}^2$ de área de piso, $39,60\text{m}^3$ de volume, $64,56\text{m}^2$ de área de superfície interna do ambiente e $2,65\text{m}$ de pé-direito. As FIGS 30 e 31 apresentam os cortes destes ambientes.

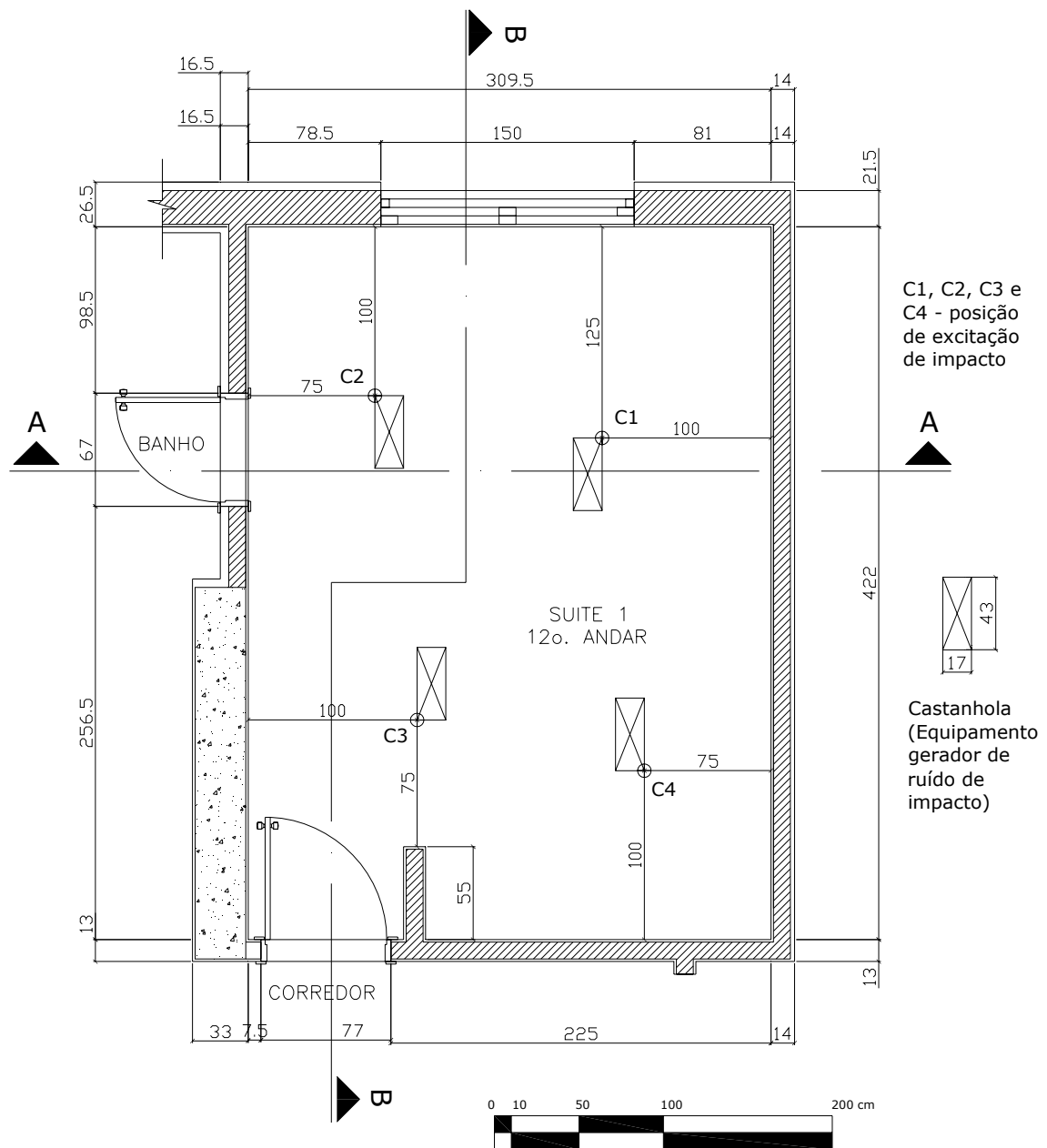


FIGURA 27 - Pontos de excitação de impacto – suíte do piso de ensaio

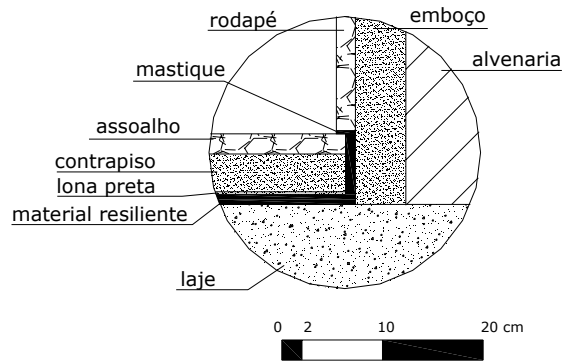


FIGURA 28 – Detalhe do piso de ensaio

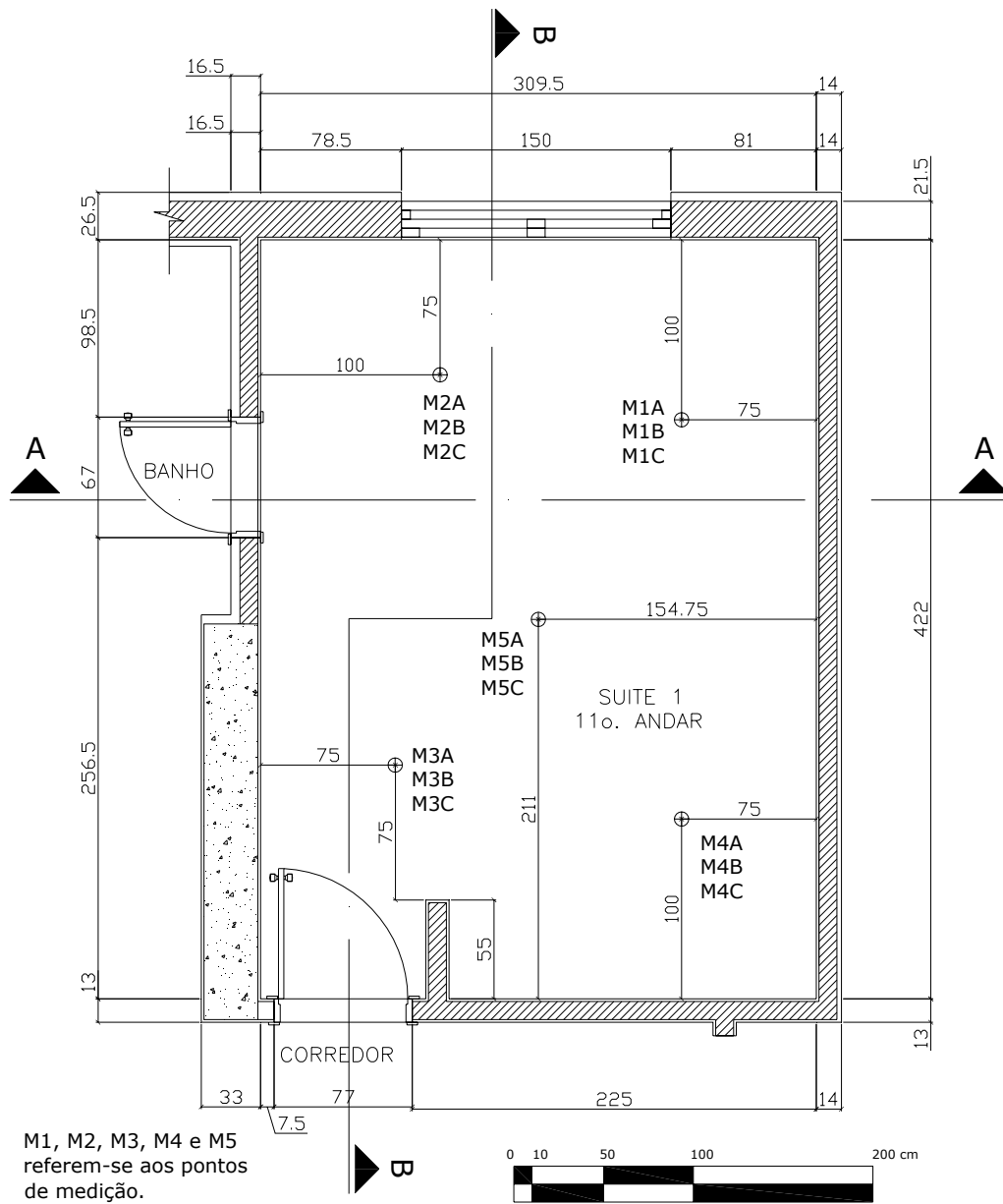


FIGURA 29 – Pontos de medição sonora – suíte abaixo do piso de ensaio

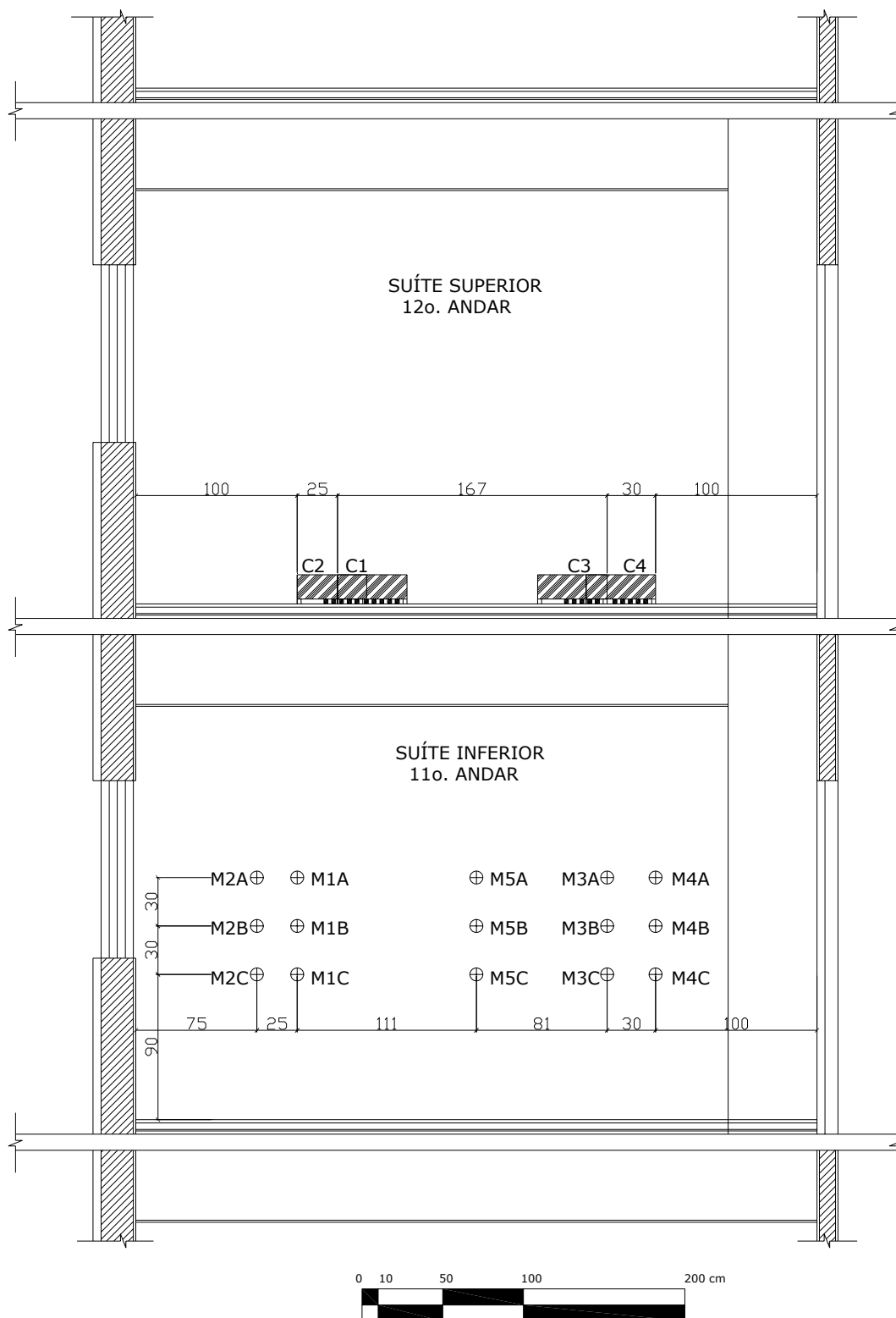


FIGURA 30 – Corte BB

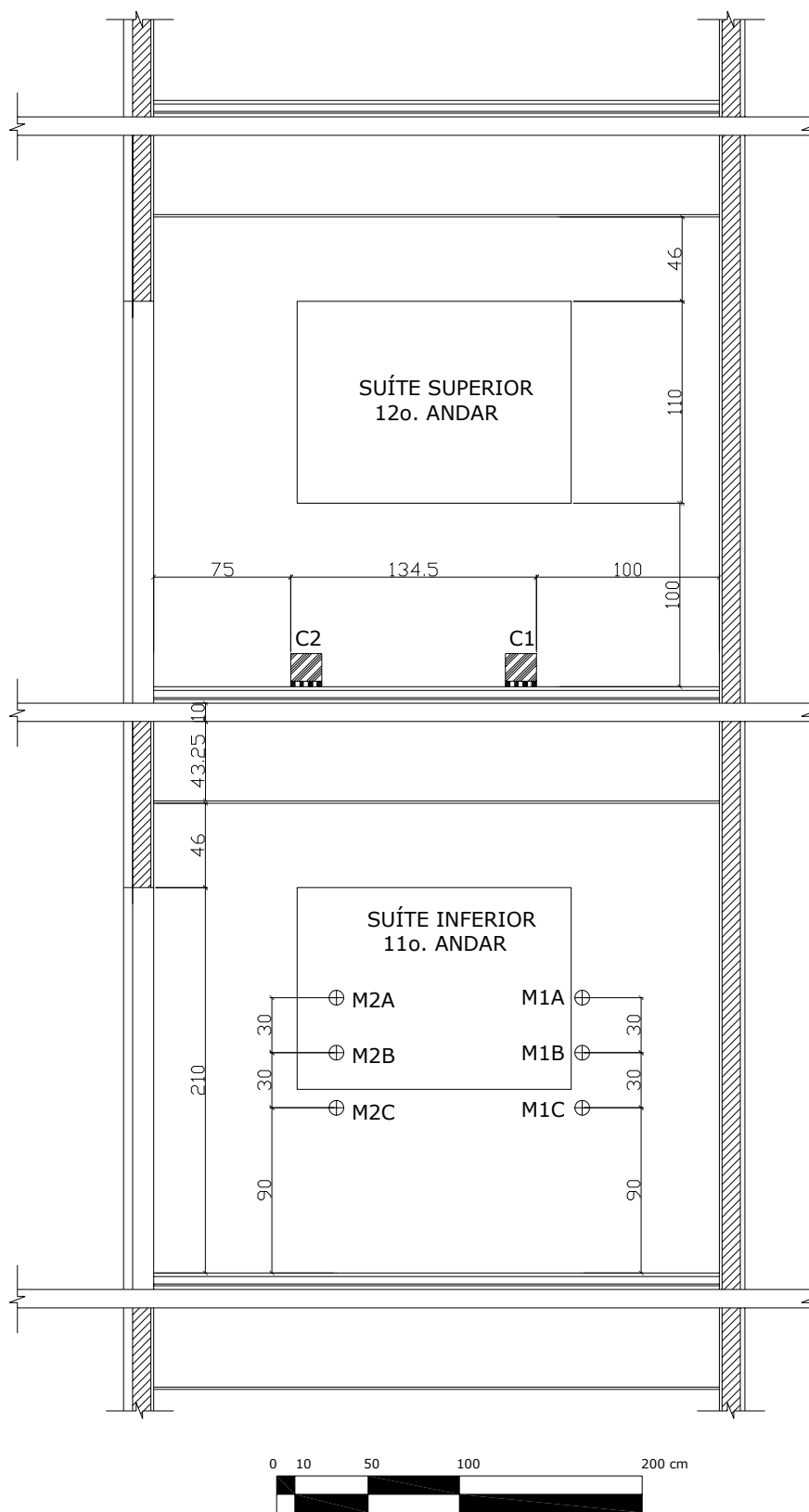


FIGURA 31 – Corte AA

Os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira, foram ensaiadas 32 configurações de pisos flutuantes simplificados, com dimensões reduzidas de 1m² (1mx1m) de área em planta. Na segunda etapa, foram ensaiadas 16 configurações de piso flutuante completos, instalados em toda área de piso (12,94m²) da suíte de ensaio.

Nas configurações com pisos flutuantes simplificados (ver FIGS no Anexo B), foram utilizadas diversas combinações de materiais resilientes, com manta de polietileno e/ou manta de lã de vidro, e contrapiso de concreto, com 5cm de espessura, sobre laje estrutural de concreto maciço, de 10cm de espessura (TAB 4).

TABELA 4 – Configurações dos 32 ensaios de piso flutuante simplificados

CONFIGURAÇÕES DE PISOS FLUTUANTES SIMPLIFICADOS	
1. Laje + P10 + Contrapiso	17. Laje + 2 P10 + L50 + 2 P10 + Contrapiso
2. Laje + L15 + Contrapiso	18. Laje + L50 + 2 P10 + L50 + Contrapiso
3. Laje + P10 + L15 + Contrapiso	19. Laje + L50 + Contrapiso
4. Laje + P10 + L15 + P10 + Contrapiso	20. Laje + 5 P10 + Contrapiso
5. Laje + L15 + P10 + L15 + Contrapiso	21. Laje + 3 P10 + 2 L15 + Contrapiso
6. Laje + 2 P10 + L15 + P10 + Contrapiso	22. Laje + 3 P10 + 3 L15 + Contrapiso
7. Laje + 2 P10 + L15 + 2 P10 + Contrapiso	23. Laje + P10 + 3 L15 + Contrapiso
8. Laje + 2 P10 + 3 L15 + 2 P10 + Contrapiso	24. Laje + 2 P10 + 3 L15 + Contrapiso
9. Laje + P10 + L50 + P10 + L50 + P10 + Contrapiso	25. Laje + 4 P10 + 2 L15 + Contrapiso
10. Laje	26. Laje + 4 P10 + 4 L15 + Contrapiso
11. Laje + 2 P10 + L15 + Contrapiso	27. Laje + 3 P10 + 4 L15 + Contrapiso
12. Laje + P10 + 2 L15 + Contrapiso	28. Laje + 2 P10 + 4 L15 + Contrapiso
13. Laje + 3 P10 + L15 + Contrapiso	29. Laje + 1 P10 + 4 L15 + Contrapiso
14. Laje + 4 P10 + L15 + Contrapiso	30. Laje + P10 + L50 + Contrapiso
15. Laje + 4 P10 + L50 + Contrapiso	31. Laje + 2 P10 + L50 + Contrapiso
16. Laje + 2 L50 + 2 P10 + Contrapiso	32. Laje + L15 + L50 + L15 + L50 + L15 + Contrapiso

onde,

P10 – Manta de polietileno com 10mm de espessura, densidade 35kg/m³;

L15 – Lã de vidro com 15mm de espessura, densidade 60kg/m³;

L50 – Lã de vidro com 50mm de espessura, densidade 40kg/m³.

Nas configurações de pisos flutuantes completos (ver FIGS no Anexo A), diversos materiais foram utilizados: madeira ou porcelanato para o assoalho; argamassa, placa

cimentícia ou placa sanduíche “Masterboard” para o contrapiso, manta de polietileno ou manta de lã de vidro como material resiliente; e a laje estrutural de concreto maciço. A TAB 5 apresenta as configurações desses ensaios de piso com suas respectivas espessuras.

TABELA 5 – Configuração dos 16 ensaios de piso flutuante completos.

CONFIGURAÇÕES DE PISOS FLUTUANTES COMPLETOS
1. Laje
2. Laje + L15 + argamassa 40mm + porcelanato 9mm
3. Laje + L15 + placa cimentícia 12mm + porcelanato 9mm
4. Laje + L15 + placa cimentícia 10mm + porcelanato 9mm
5. Laje + L15 + placa cimentícia 20mm + porcelanato 9mm
6. Laje + argamassa 40mm + porcelanato 9mm
7. Laje + L15 + placa sanduíche1 14mm + porcelanato 9mm
8. Laje + P10 + argamassa 40mm
9. Laje + P10 + argamassa 40mm + porcelanato 9mm
10. Laje + P10 + argamassa 40mm + madeira 19mm
11. Laje + L15 + placa sanduíche2 14mm + porcelanato 9mm
12. Laje + L15 + argamassa 40mm + madeira 19mm
13. Laje + 2 L15 + argamassa 40mm + porcelanato 9mm
14. Laje + 2 P10 + argamassa 40mm + porcelanato 9mm
15. Laje + argamassa 40mm + madeira 19mm
16. Laje + 2 L15 + 2 P10 + argamassa 40mm + porcelanato 9mm

Vale ressaltar que a “placa sanduíche 1”, da Configuração 7, refere-se ao ensaio com placa sanduíche “Masterboard” *sem* o isolamento lateral nas paredes, com lã de vidro, e a “placa sanduíche 2”, da Configuração 11, ao ensaio com placa sanduíche “Masterboard” *com* o isolamento lateral nas paredes, com lã de vidro.

4.2. Características dos Materiais de Ensaio

4.2.1. Material resiliente

4.2.1.1. Manta de polietileno

A manta de polietileno consiste em uma espuma leve, de célula fechada, com uma estrutura que se assemelha a uma colméia. O polietileno é um polímero pertencente à classe dos termoplásticos.

As propriedades estruturais da manta de polietileno, assim como a caracterização do polímero, foram estudadas no trabalho de MACHADO (2003). Nos estudos por ele realizados, 5 ensaios de compressão foram realizados em amostras de 2,2cm de espessura, com área transversal de 25cm² e densidade de 35kg/m³. O módulo de elasticidade da manta de polietileno foi dado em função da espessura do contrapiso.

Considerou-se que a rigidez da manta trabalha numa faixa linear definida pela inclinação do módulo de elasticidade, E, que varia com a espessura da manta e com a deformação. A rigidez da manta por unidade de área, s', é definida pela razão entre o módulo de elasticidade, E, e a espessura da manta, d, $\rightarrow s' = \frac{E}{d}$. A TAB 6 mostra as

propriedades estruturais da manta de polietileno.

TABELA 6 – Propriedades estruturais da manta de polietileno

Espessura do contrapiso [m]	Módulo de elasticidade [MPa]	Rigidez da manta [MPa/m]		
		Espessura da manta [m]		
		0,022	0,010	0,005
0,02	0,0979	4,45	9,79	19,58
0,04	0,0957	4,35	9,57	19,14
0,08	0,0934	4,24	9,34	18,68

Fonte: MACHADO, 2003

4.2.1.2. Manta de lã de vidro

A manta de lã de vidro é um material fibroso com alto desempenho acústico no tratamento de ambientes. Apresenta um alto coeficiente de absorção acústica, sendo sua aplicação indicada para pisos (FIG 32 - piso flutuante), forros ou na confecção de paredes duplas, no processo construtivo conhecido como massa-mola-massa, substituindo com vantagens as paredes monolíticas de alta densidade, dificultando a transmissão dos ruídos devido a sua descontinuidade e elasticidade. Nos ensaios deste trabalho, foram utilizados dois tipos de manta de lã de vidro: uma com 15mm de espessura e densidade de 65kg/m^3 e outra com 50mm de espessura e densidade de 40kg/m^3 .

Este material apresenta também um baixo coeficiente de condutividade térmica resultando em um alto desempenho no isolamento térmico. Além disso, a lã de vidro apresenta diversas propriedades: incombustível; alta durabilidade; resistência a microorganismos e intempéries; dimensionalmente estável, resistência a altas temperaturas; fácil aplicabilidade; inquebrável, reduzindo as perdas nas obras; não deteriora as superfícies com as quais está em contato.



FIGURA 32 – Lã de vidro (em amarelo) sob contrapiso (em cinza) e assoalho (em madeira) –
(www.isover.com.br)

4.2.2. Materiais de assoalho e contrapiso

Como já exposto, os materiais de assoalho utilizados nas configurações de pisos flutuantes neste trabalho foram o porcelanato e o piso de madeira maciça.

O porcelanato utilizado é da marca Elizabeth, na cor gran crema, polido, com dimensões de $398 \times 398 \times 9\text{mm}$ e 2mm de junta, resultando em placas com $400\text{mm} \times 400\text{mm}$. Para

as juntas entre as placas de porcelanato foi utilizado o *Rejuntamento flexível Quartzolit* da marca Weber Quartzolit, na cor areia.

A argamassa colante para o assentamento do porcelanato foi a *Super Cimentcola Quartzolit* da marca Weber Quartzolit, tipo ACII, na cor cinza.

O piso de madeira maciça, também utilizado como assoalho em algumas configurações de ensaio, é da marca Piso Pronto, com 19mm de espessura. Para o assentamento foi utilizada a cola de poliuretano, também da marca Piso Pronto.

Os materiais de contrapiso utilizados nas configurações de pisos flutuantes neste trabalho foram argamassa de cimento e areia, traço 1:5, placa cimentícia e placa sanduíche Masterboard.

A placa cimentícia utilizada é a Brasiplac da marca Brasilit. Essas placas foram desenvolvidas dentro das especificações de normas ISO / Classe A4, e são resultado da mistura homogênea de cimento reforçado com fios sintéticos de polipropileno. Foram utilizadas placas com dimensões de 1,20m x 2,4m e espessuras de 10mm e 12 mm.

A placa sanduíche utilizada é a Masterboard Slim da marca “Brasilit”. Essa placa é uma combinação de duas placas cimentícias Brasiplac com um painel home OSB Masisa entre elas. As placas utilizadas são comercializadas nas dimensões de 1,20m de largura, 2,4m de comprimento e 14mm de espessura.

4.3. Equipamentos

Os equipamentos utilizados na realização das medições sonoras foram:

- Analisador de Frequências e Integrador Sonoro em Tempo Real, marca 01dB-Stell, modelo SOLO MVI, número de série 11556;
- Microfone marca GRAS, modelo MCE 212, número de série 57692;
- Pré-amplificador marca 01dB-Stell, modelo PRE21S, número de série 12140.

Esses equipamentos são classificados como do tipo 1 (um), conforme padrões estabelecidos pelas normas IEC 651, IEC 804, IEC 61672-1, IEC 1260, ANSI S1.11. Também foi utilizado:

- Calibrador de nível de pressão sonora marca 01dB, modelo CAL21, número de série 51231378, classificado como do tipo 1, conforme padrões estabelecidos pela norma IEC-60942, com precisão de $\pm 0,3\text{dB}$ e com variação de $\pm 2\%$ na frequência de emissão de 1000Hz.

Os equipamentos possuem certificados de calibração com prazos de validade em vigor, emitidos pela empresa CHROMPACK, a qual está integrada à Rede Brasileira de Calibração e devidamente credenciada pelo INMETRO. O N° do Certificado de Calibração do Analisador de Frequência, emitido pela CHROMPACK é 13105, datado de 04 de outubro de 2006, enquanto que o N° do Certificado de Calibração do Calibrador de Nível Sonoro é 13104, também datado de 04 de outubro de 2006.

- Máquina de ruído de impacto padrão que atende às especificações da norma ISO 140-7, fabricada pela DBTRONICS, Anexo A (FIG 33).



FIGURA 33 – Máquina geradora de ruído de impacto – Padrão ISO 140-7

4.4. Procedimentos Metodológicos

Para realização do ensaio, a Construtora Castor fez as vedações necessárias para minimizar a influência do ruído aéreo de forma a assegurar a qualidade dos resultados do ensaio de ruído de impacto em pisos. Para isso, vedou as janelas e a porta do banheiro das duas suítes com alvenaria. As portas de acesso aos cômodos de ensaio

foram acusticamente tratadas, de forma a garantir baixo ruído de fundo no ambiente. Dessa forma, as medições foram realizadas em um ambiente de campo, entretanto com características de laboratório.

4.4.1. Correção de ruído de fundo

As medições do nível de ruído de fundo foram realizadas em todos os ensaios para que, caso necessário, fossem efetuadas as devidas correções nos níveis de ruído de impacto medidos no ambiente receptor (andar inferior).

As medições de ruído de fundo foram efetuadas em 5 posições de equipamento de medição, em planta, posicionadas em tripé a 0,9m, 1,2 m e 1,5m de altura do piso da suíte do andar inferior (Figuras 38 e 39). Em cada posição do equipamento de medição, foi realizado um registro de nível sonoro equivalente com intervalo de duração de 1 minuto, resultando em 15 registros de ruído de fundo, para cada medição.

4.4.2. Medição da perda por transmissão do piso, segundo ISO 140-4: 1998

As medições da perda por transmissão do piso têm a finalidade de quantificar a interferência do ruído aéreo nos ensaios de ruído de impacto, já que foram realizados em uma obra e não em um laboratório. Estas medições foram realizadas em bandas de 1/3 de oitava, com uma fonte geradora de ruído rosa (01 caixa acústica) posicionada em dois locais na suíte do pavimento superior. O ruído foi registrado por equipamentos de medição simultaneamente posicionados nos pavimentos superior e inferior. Para cada posição de fonte havia 5 posições de medição no pavimento superior e para cada uma destas posições do pavimento superior, foram realizadas 15 posições de medição no pavimento inferior, totalizando 150 medições (FIG 34). O cálculo da perda por transmissão do piso foi efetuado segundo a norma ISO 140-4.

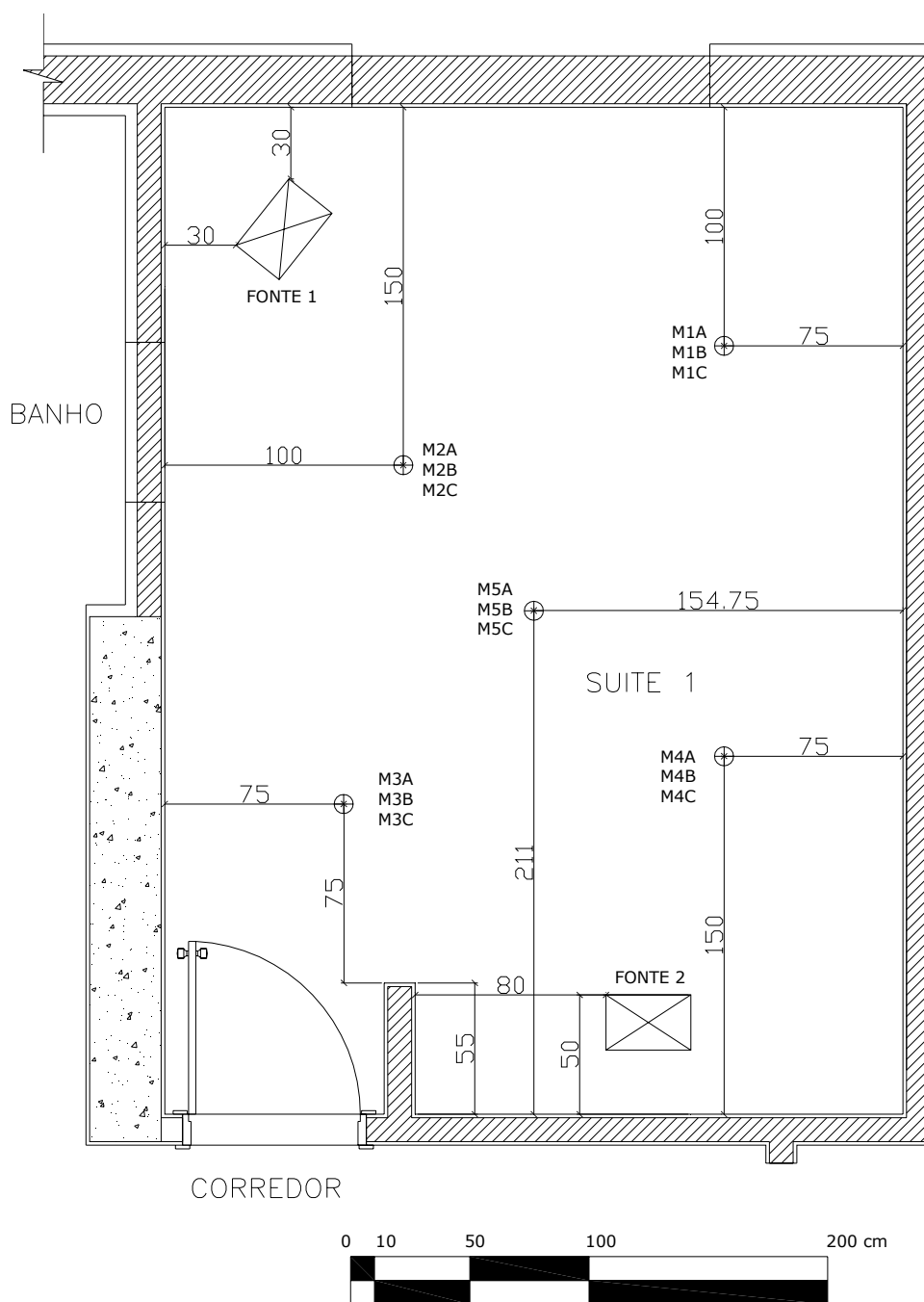


FIGURA 34 – Perda por transmissão – posições da fonte e das medições do pavimento superior

4.4.3. Medição de absorção sonora, segundo ISO 354:2003

Para avaliar os Níveis de Pressão Sonora de Impacto Normalizados, foram realizadas medições de absorção sonora de forma a quantificar a influência do ruído reverberante no ambiente da suíte receptora, no pavimento inferior. Essas medições de absorção sonora foram realizadas em conformidade com a ISO 354:2003, utilizando-se estouro de balões como fonte de ruído impulsivo. Após o impulso acústico seguiu-se a medição do decaimento sonoro durante 5s. Os valores de reverberação foram efetuados em terças de oitava, no ambiente receptor (suíte inferior), nas 15 posições de equipamento de medição. Para cada posição, foram realizadas 3 medições de decaimento sonoro, seguido do estouro do balão, em 45 registros de resposta de reverberação.

4.4.4. Medição do nível de ruído de impacto do piso, segundo ISO 140-7: 1998

As medições de ruído de impacto foram registradas em bandas de 1/3 de oitava. A máquina geradora de ruído de impacto padrão, “castanhola”, foi posicionada em 4 diferentes locais distribuídos no piso da suíte do pavimento superior. As posições de excitação de impacto estão indicadas na FIG 27.

As medições do nível de ruído de impacto foram efetuadas, para cada posição da castanhola no piso superior, em 5 posições de equipamento de medição, posicionadas em tripé a 0,9m, 1,2m e 1,5m de altura do piso da suíte do andar inferior, com distância mínima das paredes de 1m e distância mínima entre as posições de equipamento de medição de 1,14m. Em cada posição deste equipamento, foi realizado um registro de nível sonoro equivalente com intervalo de duração de 1 minuto, resultando em 60 (sessenta) registros de ruído de impacto.

4.4.5. Medição do nível de ruído de impacto de pisos, utilizando pisos simplificados

O ruído de impacto de pisos também foi avaliado por meio de pisos simplificados, utilizando uma placa de concreto maciça como contrapiso, de dimensões de 1m x 1m e 5cm de espessura.

Esse procedimento de ensaio foi desenvolvido com a finalidade de minimizar o tempo de medições e evitar desperdício de materiais em campo, uma vez que a instalação e

remoção de uma configuração de piso flutuante completo são bastante laboriosas e demanda uso de maior quantidade de materiais.

Dessa forma, as medições de ruído de impacto foram registradas também em bandas de 1/3 de oitava. O contrapiso de concreto foi posicionado, no centro do pavimento superior, enquanto que as medições foram realizadas em 3 pontos na parte mais central da suíte do pavimento inferior.

Como mencionado anteriormente, foram ensaiadas 32 configurações, com diferentes sistemas de piso flutuante simplificados, sendo que em cada configuração o material resiliente foi alterado, enquanto a placa de concreto foi mantida como contrapiso.

Para cada configuração, a máquina geradora de ruído de impacto padrão, “castanhola”, foi posicionada em um local no centro da placa de contrapiso, na suíte do pavimento superior (FIG 35), e o equipamento de medição foi posicionado em três locais com 1,5m de altura, na suíte do pavimento inferior (FIG 36). As medições do nível de ruído de impacto foram efetuadas com distância mínima das paredes de 1m e distância mínima entre as posições de equipamento de medição de 1m.

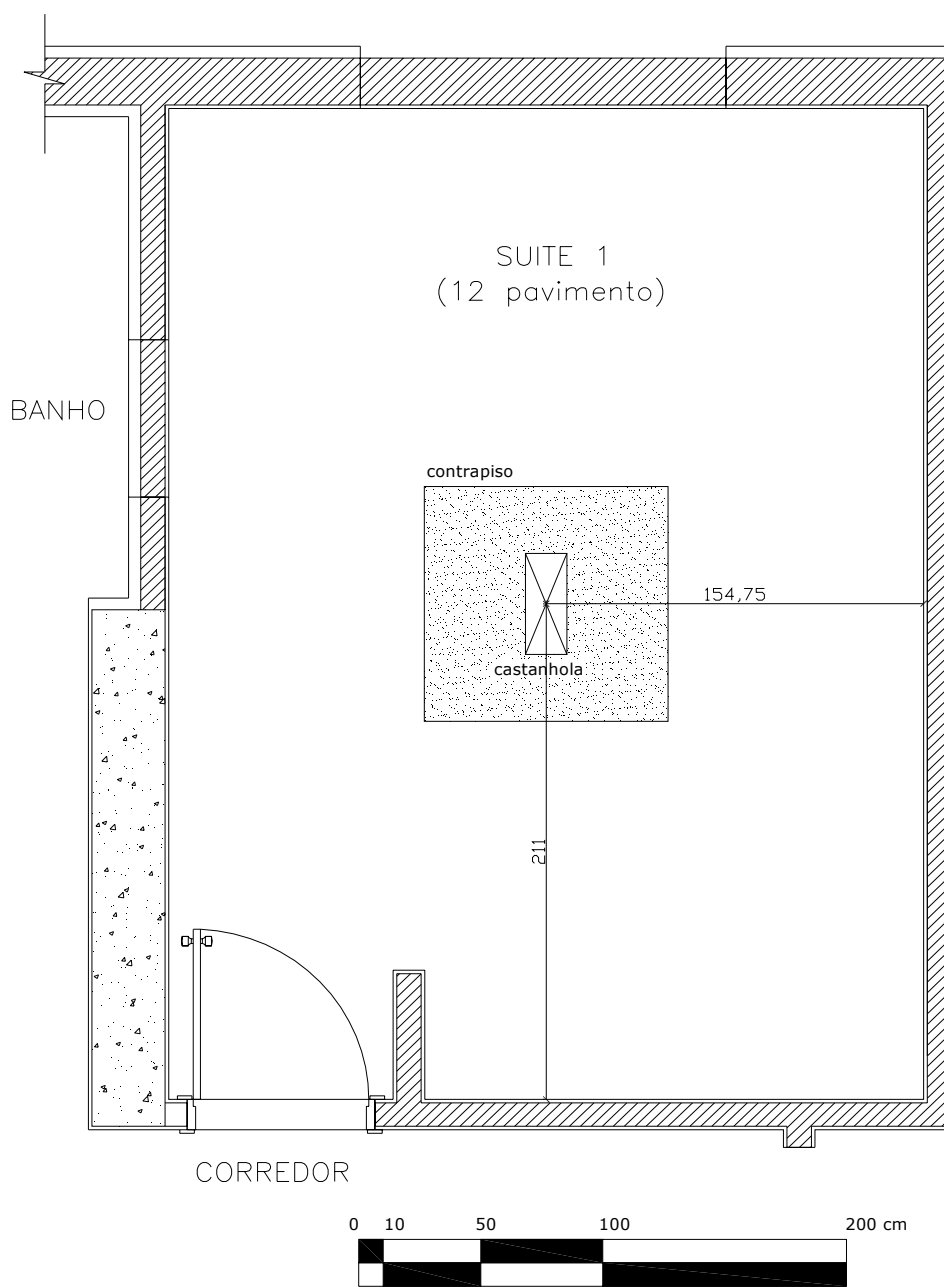


FIGURA 35 – Posição da castanhola e do protótipo no pavimento superior.

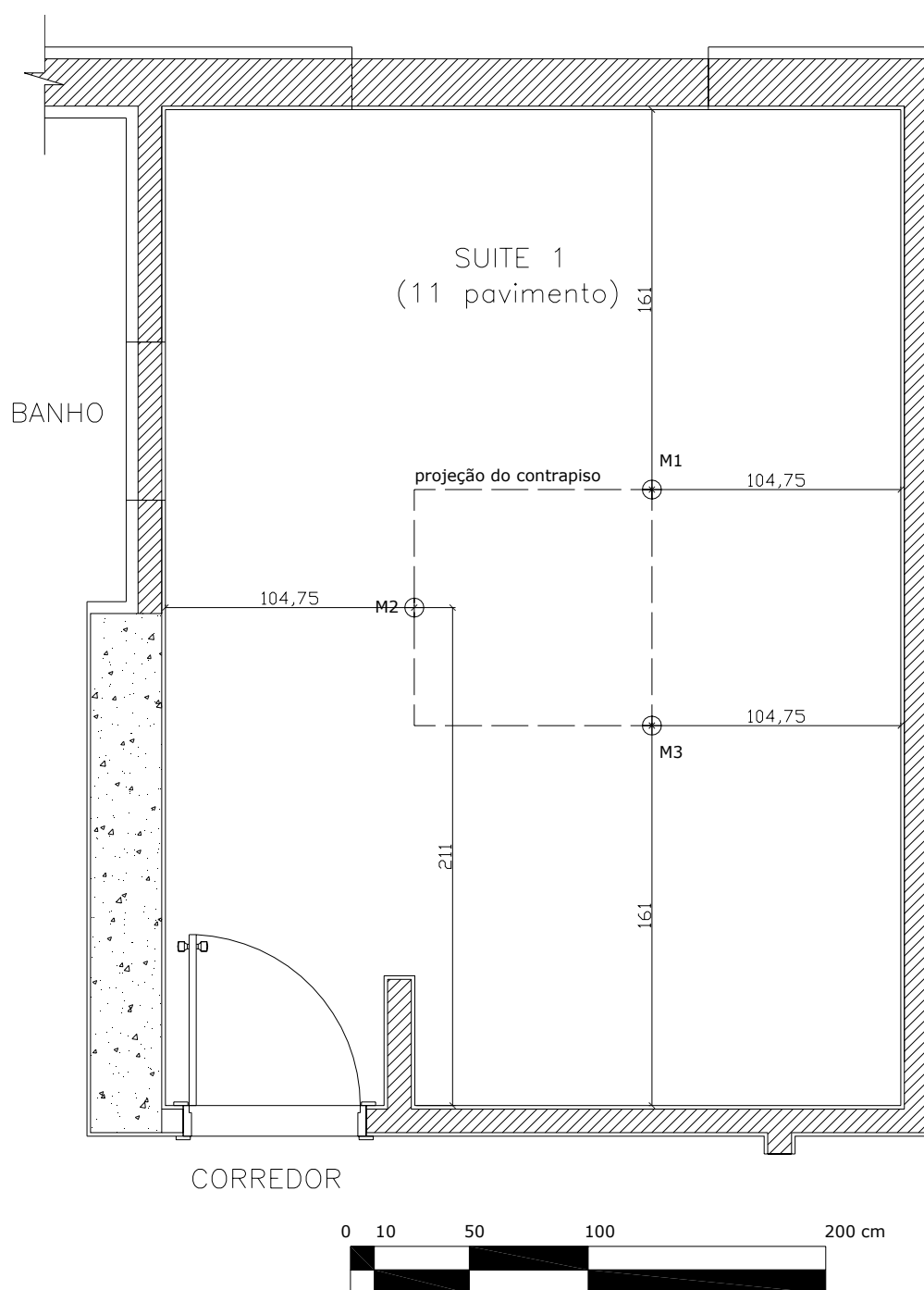


FIGURA 36 – Posição dos pontos de medição no pavimento inferior.

4.4.6. Classificação dos resultados dos ensaios

Após avaliação do sistema de piso flutuante, por meio de ensaios de ruído de impacto de piso, utilizando metodologias de ensaios em conformidade com as normas ISO 140-7: 1998 e ISO 354:2003, calculou-se a Classe de Isolamento de Impacto (CII) de acordo com a norma ASTM E989:1989, e o Nível de Pressão Sonora de Impacto Normalizado

Ponderado (L'_{nw}) segundo a ISO 717-2. A CII e o L'_{nw} são valores globais ponderados que representam o comportamento do piso flutuante diante do ruído gerado pela máquina de ruído de impacto padrão. Os valores de referência de CII recomendados pelo FHA (*Federal Housing Administration*) para o caso em questão estão discriminados na TAB 7.

TABELA 7- Valores de referência de CII recomendados pelo FHA

Relação entre os ambientes			Grau I	Grau II	Grau III
Apartamento A	acima de	Apartamento B	CII	CII	CII
quarto	acima de	quarto	55	52	48
sala de estar	acima de	quarto	60	57	53
cozinha	acima de	quarto	65	62	58
sala íntima	acima de	quarto	65	62	58
corredor	acima de	quarto	65	62	58
quarto	acima de	sala de estar	55	52	48
sala de estar	acima de	sala de estar	55	52	48
cozinha	acima de	sala de estar	60	57	53
sala íntima	acima de	sala de estar	62	60	56
corredor	acima de	sala de estar	60	57	53
quarto	acima de	cozinha	52	50	46
sala de estar	acima de	cozinha	55	52	48
cozinha	acima de	cozinha	55	52	48
banheiro	acima de	cozinha	55	52	48
sala íntima	acima de	cozinha	60	58	54
corredor	acima de	cozinha	55	52	48
quarto	acima de	sala íntima	50	48	46
sala de estar	acima de	sala íntima	52	50	48
cozinha	acima de	sala íntima	55	52	50
banheiro	acima de	banheiro	52	50	48
corredor	acima de	corredor	50	46	45

Fonte: BERENDT, 1967

Notas:

1. Grau I - recomendado para edificações localizadas em áreas residenciais urbanas silenciosas, com ruído de fundo noturno no exterior da edificação inferior a 40dB(A). Recomenda-se, também, a utilização desse critério em edifícios de apartamentos onde se deseja o máximo de isolamento sonora, independentemente da localização da edificação.
2. Grau II - recomendado para edificações localizadas em áreas residenciais urbanas medianamente silenciosas, com ruído de fundo noturno no exterior da edificação entre 40dB(A) e 45dB(A).
3. Grau III - recomendado para edificações localizadas em áreas com elevado ruído de fundo noturno no exterior da edificação, acima de 55dB(A), e é considerada a menor isolamento admissível entre ambientes de diferentes unidades de uma edificação.

5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

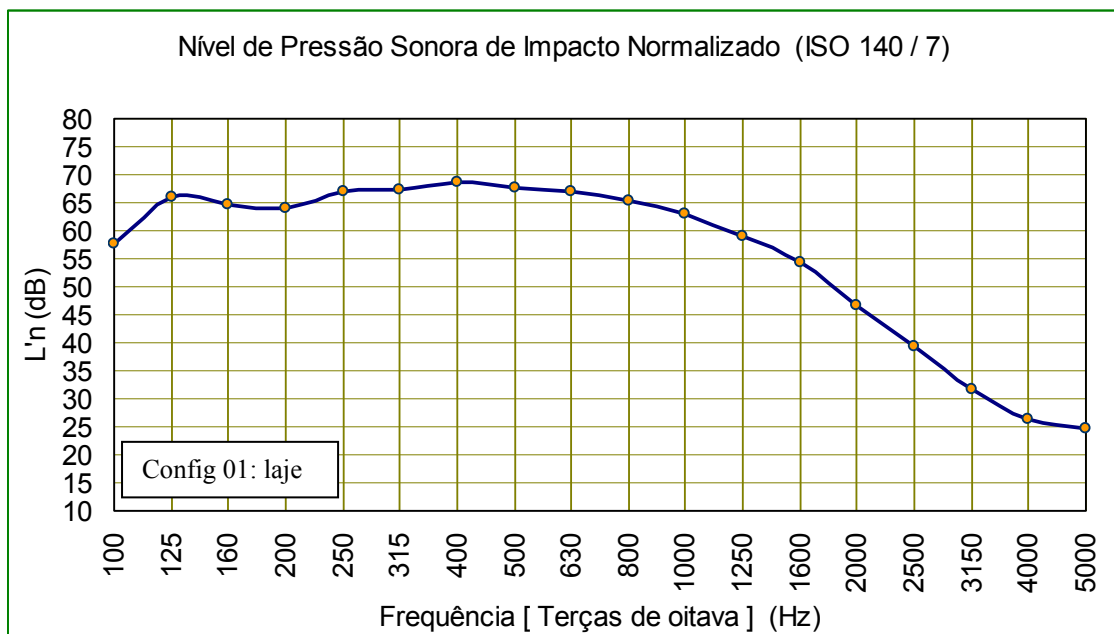
Como exposto, foram realizados 16 ensaios de medição de ruído de impacto em pisos flutuantes completos e 32 ensaios de medição de ruído de impacto em pisos flutuantes simplificados com dimensões de 1mx1m. Além disso, também foram realizadas medições da perda por transmissão do piso para identificar interferências do ruído aéreo nos ensaios de ruído de impacto de pisos efetuados em campo.

Na medição da perda por transmissão do piso, constatou-se que o ruído aéreo, no caso o ruído de flanco, não interferiu nas medições de ruído de impacto do piso. Isso se deve ao fato que as portas dos banheiros e as janelas dos ambientes da fonte e de medição foram vedadas com alvenaria, e as portas de entrada desses ambientes foram acusticamente tratadas, resultando em uma situação de campo muito semelhante a uma situação de laboratório (ver resultados no Anexo C).

5.1. Ensaios de medição de ruído de impacto em pisos flutuantes completos

Nas medições de ruído de impacto em pisos flutuantes completos, com exceção da primeira configuração, que foi constituída somente pela laje, todas as configurações obedeceram alguma graduação (I, II ou III) estabelecida pela FHA, e a maioria ficou classificada na graduação I.

A Configuração 1, constituída apenas pela laje de 100mm, alcançou $L'_{nw}= 63$, $C1= -1$ e $CII= 47$, não se enquadrando em nenhuma classificação da FHA, já que na pior situação considerada pela FHA, $CII= 48$. Por outro lado, o valor de L'_{nw} encontrado nessa configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 16dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 37 apresenta o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Observa-se que certa linearidade do valor de L'_{n} em 65dB em até 800Hz.



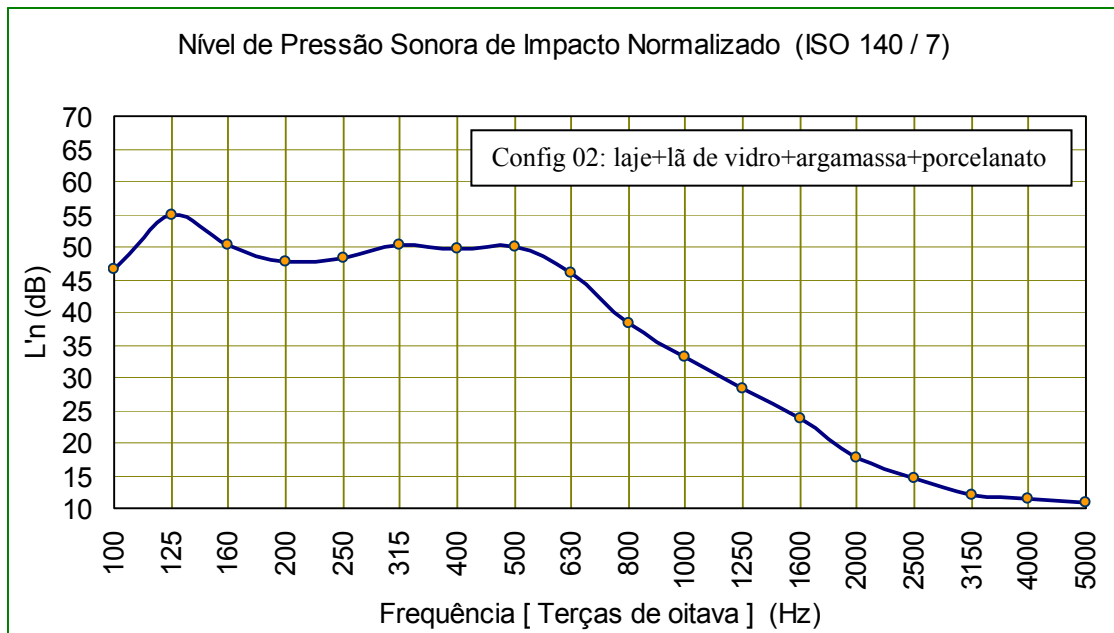
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'_{n}	58	66	65	64	67	67	69	68	67	65	63	59	54	47	39	32	26	25

$L'_{nw} = 63, C1 = -1$

$CII = 47$

FIGURA 37 – L'_{n} da Configuração 1

A Configuração 2, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw}= 44$, $C1= 0$ e $CII= 66$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 35dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 38 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Houve certa linearidade do valor de L'_{n} em 50dB em até 500Hz, com pico em 125Hz.



F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	47	55	50	48	48	50	50	50	46	38	33	28	24	18	15	12	11	11

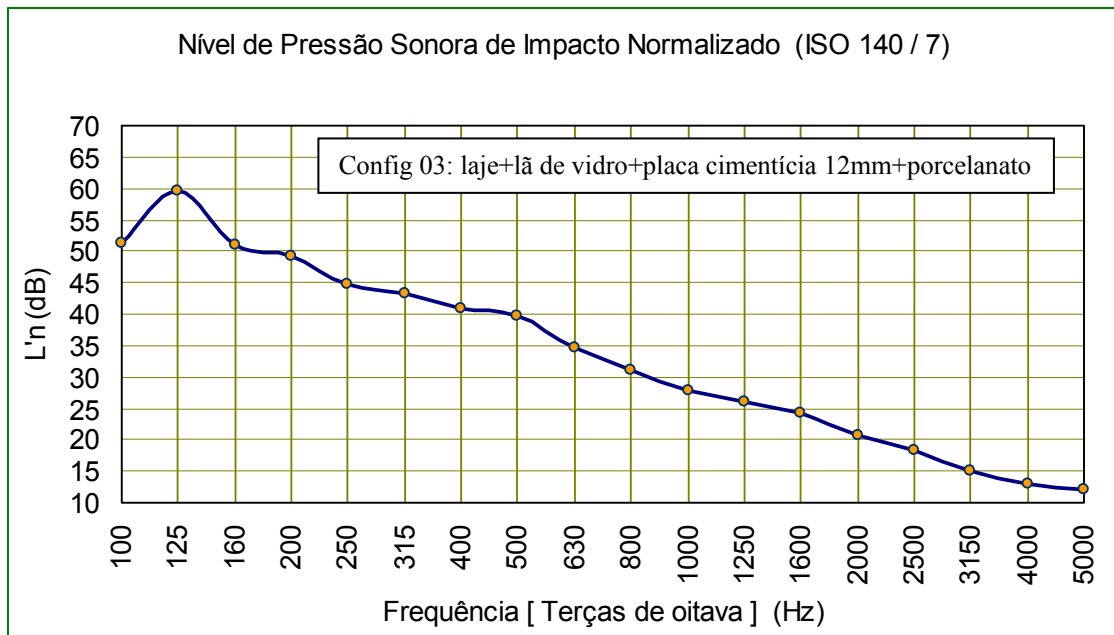
L'nw = 44, C1= 0

CII = 66

FIGURA 38 – L'n da Configuração 2

A Configuração 3, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, placa cimentícia de 12mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 42$, $C1 = 3$ e $CII = 61$, se enquadrando na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 37dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 39 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Esta configuração não mostrou nenhuma linearidade do valor de L'_{n} e, como na configuração anterior, apresentou um pico em 125Hz.

A Configuração 4, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, placa cimentícia de 10mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 45$, $C1 = 1$ e $CII = 61$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 34dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 40 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se também um pico no valor de L'_{n} em 125Hz.

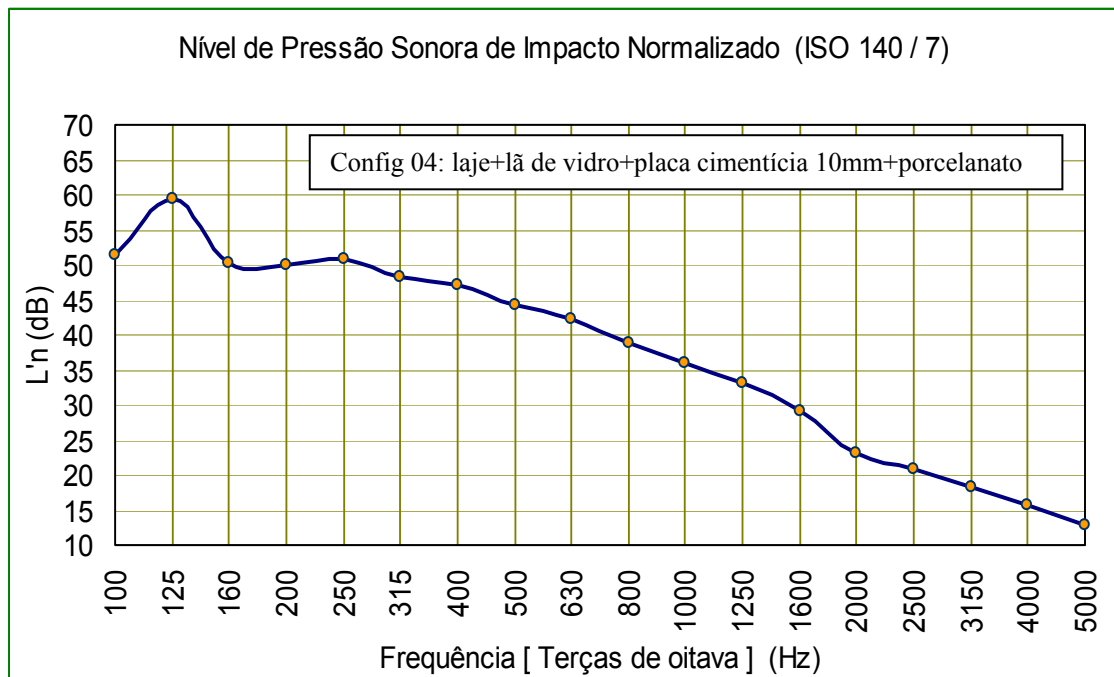


F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	51	59	50	49	44	43	40	39	34	30	27	26	24	20	18	15	13	11

L'nw = 43, C1= 3

CII = 61

FIGURA 39 – L'n da Configuração 3



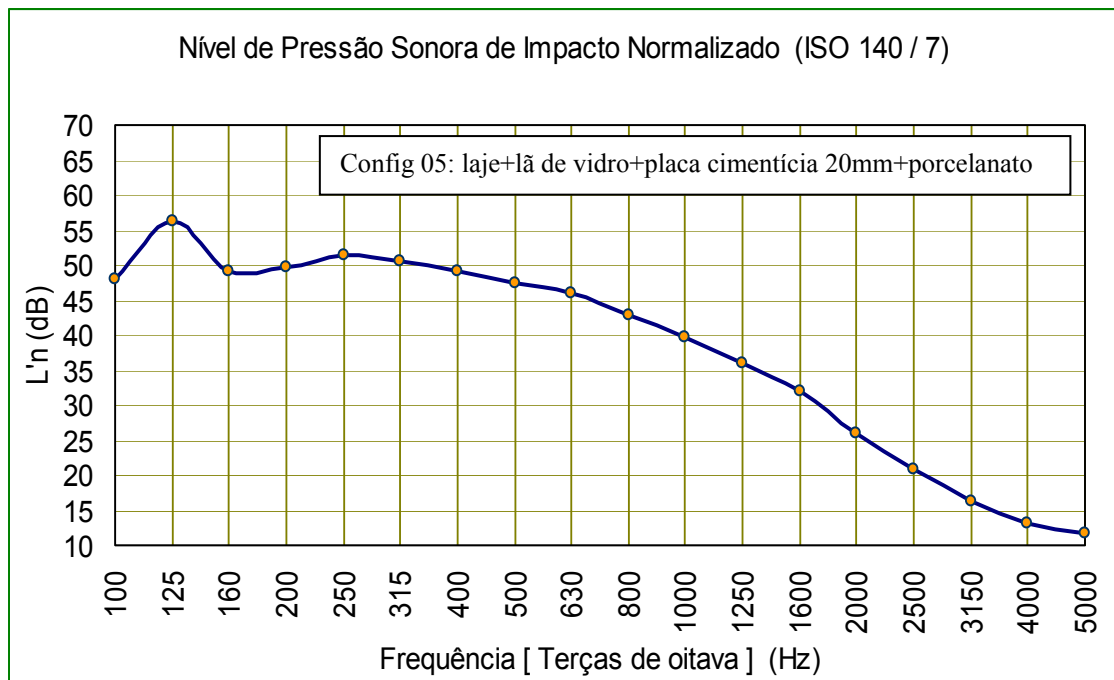
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	51	59	50	50	51	48	47	44	42	39	36	33	29	23	21	18	16	13

L'nw = 45, C1= 1

CII = 61

FIGURA 40 – L'n da Configuração 4

A Configuração 5, constituída pela laje de 100mm, lâ de vidro de 15mm, 2 placas cimentícias de 10mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 45$, $C1 = 0$ e $CII = 64$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 34dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 41 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_n desta configuração. Ressalta-se novamente um pico no valor de L'_n em 125Hz .



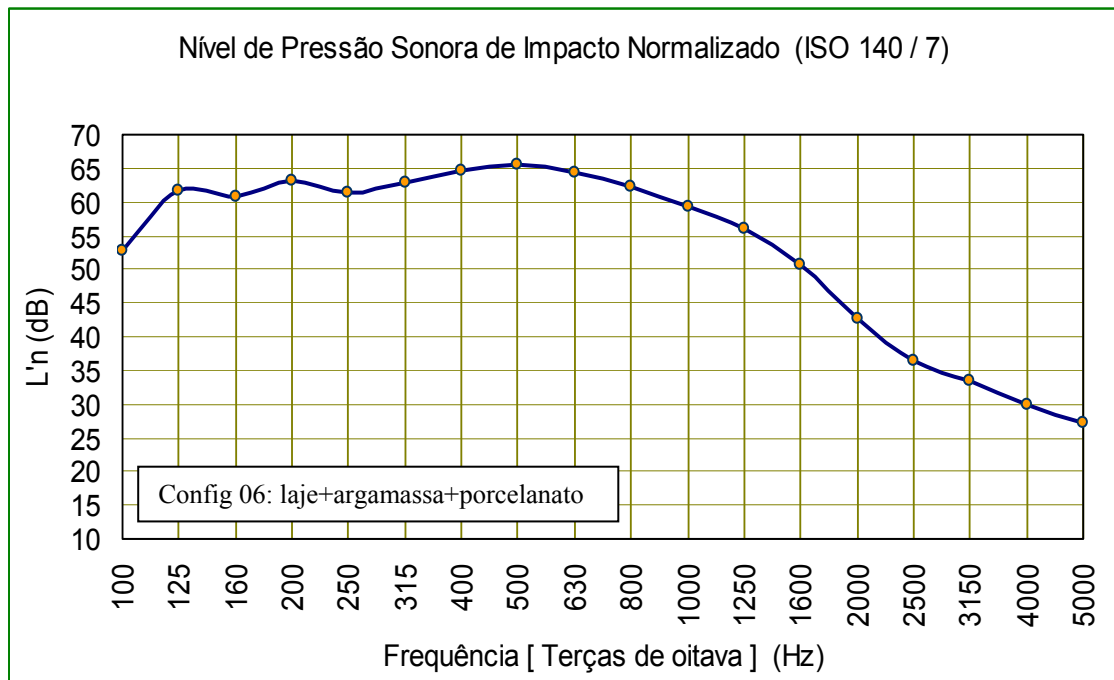
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'_n	48	56	49	50	51	51	49	47	46	43	40	36	32	26	21	16	13	12

$L'_{nw} = 45, C1 = 0$

$CII = 64$

FIGURA 41 – L'_n da Configuração 5

A Configuração 6, constituída pela laje de 100mm, argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 60$, $C1 = -2$ e $CII = 50$, enquadrando-se na graduação III da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 19dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 42 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_n desta configuração.



F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	53	62	61	63	61	63	65	65	64	62	59	56	51	43	36	33	30	27

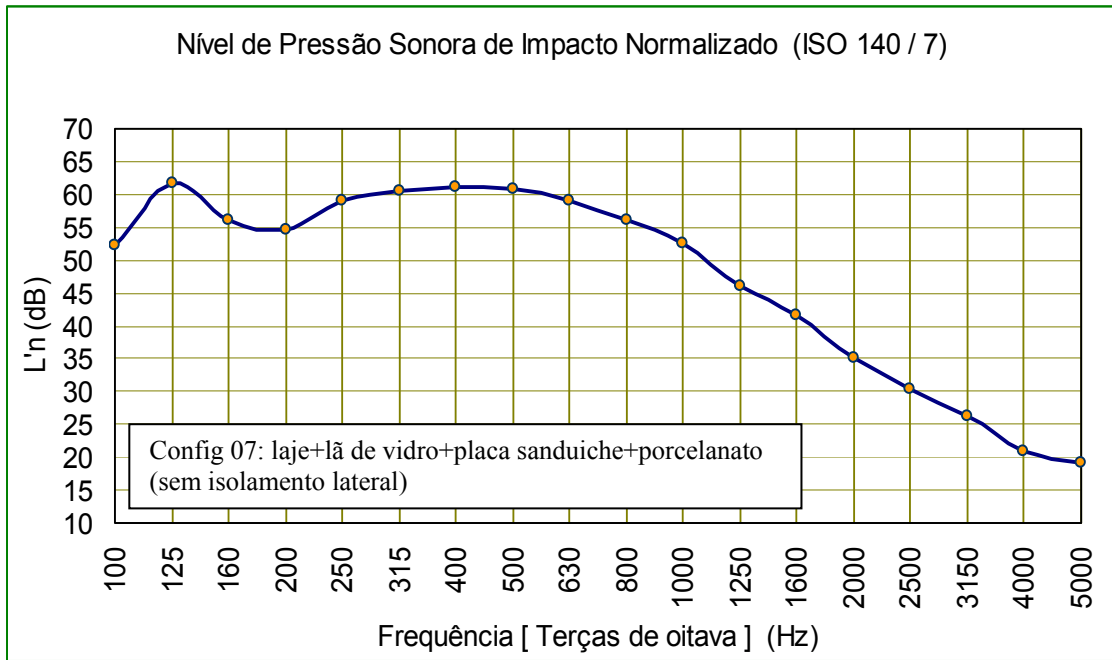
$$L'_{nw} = 60, C1 = -2$$

$$CII = 50$$

FIGURA 42 – L'n da Configuração 6

A Configuração 7, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, placa sanduíche de 14mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 55$, $C1 = -1$ e $CII = 55$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 24dB abaixo do limite nela estabelecido. Vale ressaltar que nesta medição não foi colocada manta de lã de vidro nas laterais do piso, isolando-o das paredes. A FIG 43 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se um pico no valor de L'_{n} em 125Hz .

A Configuração 8, constituída pela laje de 100mm, manta de polietileno de 10mm, argamassa de 40mm, alcançou $L'_{nw} = 53$, $C1 = 2$ e $CII = 53$, enquadrando-se na graduação II da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 26dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 44 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se também um pico no valor de L'_{n} em 125Hz .

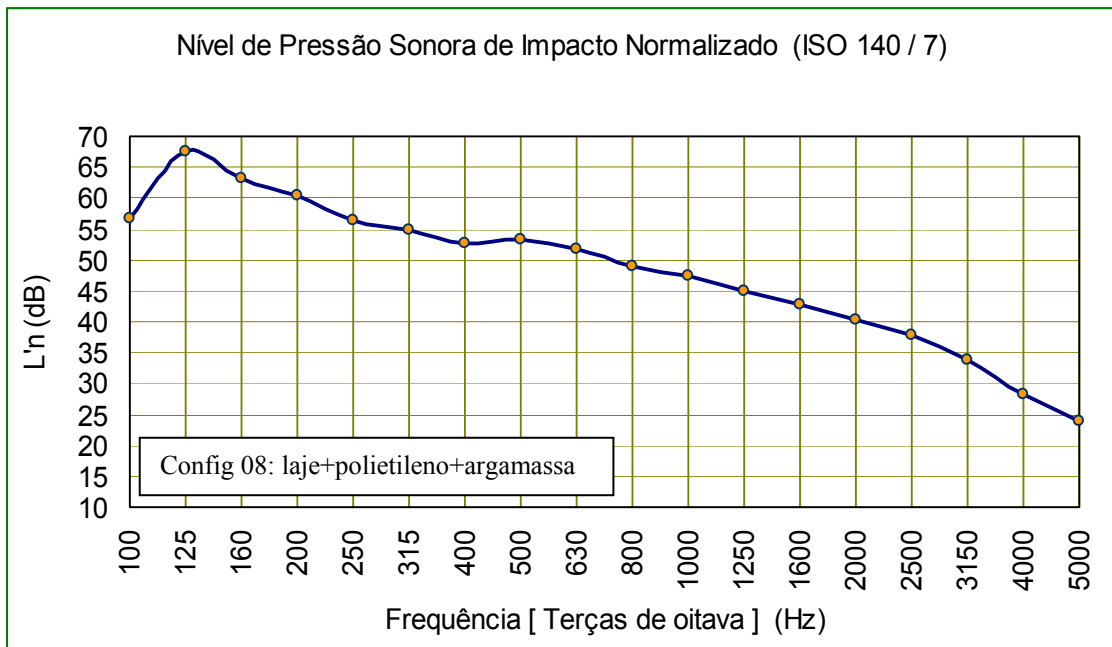


F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	52	62	56	55	59	61	61	61	59	56	53	46	42	35	30	26	21	19

L'nw = 55, C1= -1

CII = 55

FIGURA 43 – L'n da Configuração 7



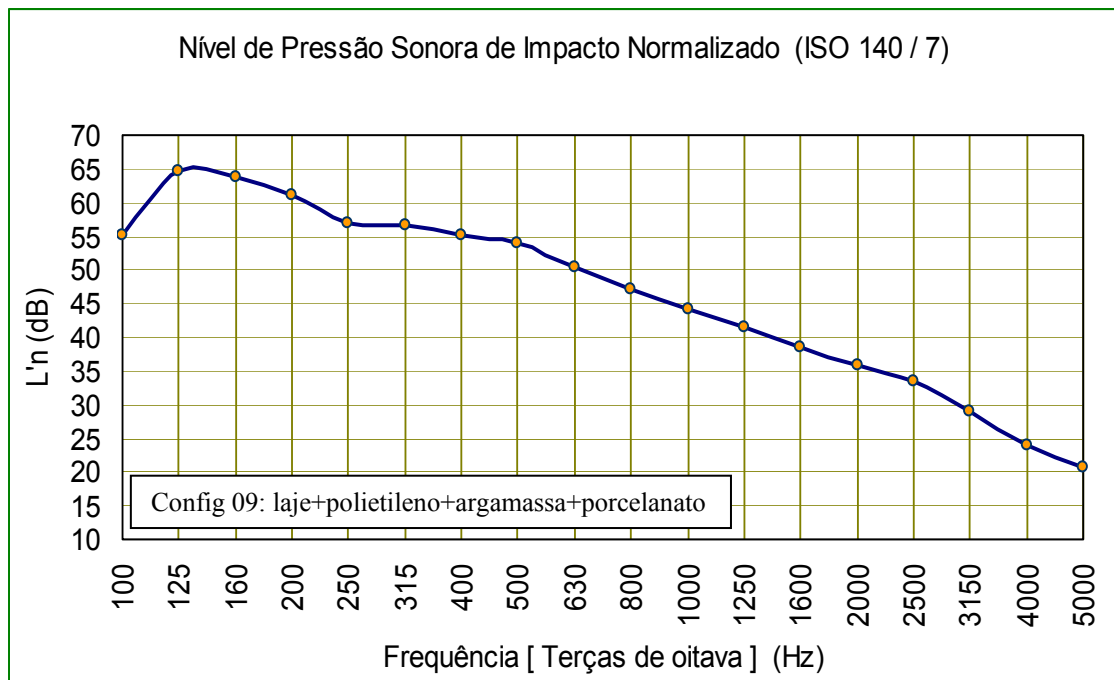
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	57	67	63	60	56	55	53	53	52	49	48	45	43	40	38	34	28	24

L'nw = 53, C1= 2

CII = 53

FIGURA 44 – L'n da Configuração 8

A Configuração 9, constituída pela laje de 100mm, manta de polietileno de 10mm, argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 54$, $C1 = 0$ e $CII = 55$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 25dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 45 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_n desta configuração. Ressalta-se novamente um pico no valor de L'_n em 125Hz.



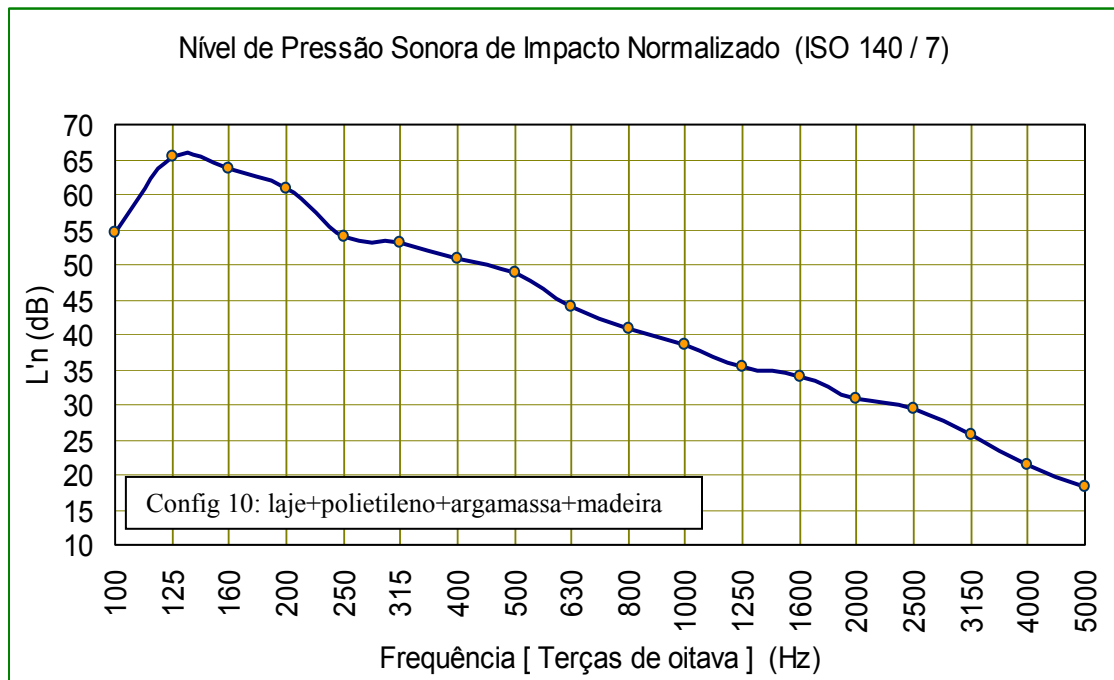
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'_n	55	65	64	61	57	57	55	54	50	47	44	41	39	36	33	29	24	21

$L'_{nw} = 54, C1 = 0$

$CII = 55$

FIGURA 45 – L'_n da Configuração 9

A Configuração 10, constituída pela laje de 100mm, manta de polietileno de 10mm, argamassa de 40mm e piso de madeira de 19mm, alcançou $L'_{nw} = 52$, $C1 = 2$ e $CII = 55$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 27dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 46 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_n desta configuração. Ressalta-se mais uma vez um pico no valor de L'_n em 125Hz.



F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	55	65	64	61	54	53	51	49	44	41	39	35	34	31	29	26	22	18

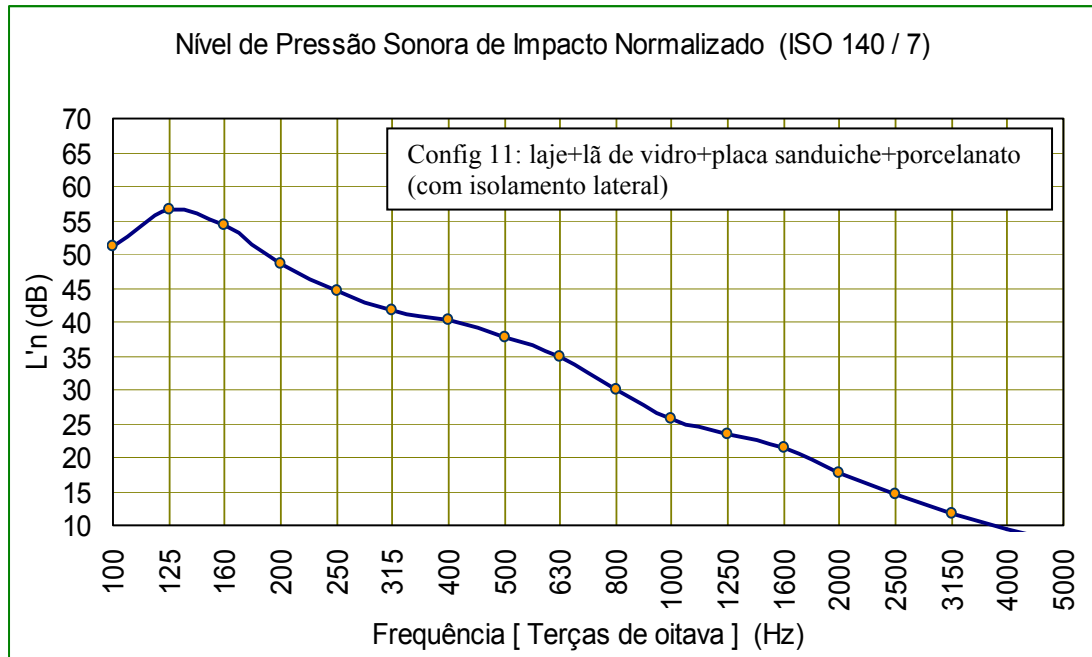
L'nw = 52, C1= 2

CII = 55

FIGURA 46 – L'n da Configuração 10

A Configuração 11, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, placa sanduíche de 14mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw} = 43$, $C1 = 1$ e $CII = 63$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 36dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 47 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se um pico no valor de L'_{n} em 125Hz.

A Configuração 12, constituída pela laje de 100mm, lã de vidro de 15mm, argamassa de 40mm e piso de madeira de 19mm, alcançou $L'_{nw} = 53$, $C1 = -2$ e $CII = 57$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 26dB abaixo do limite nela estabelecido. Vale ressaltar que nesta medição não foi colocada manta de lã de vidro nas laterais do piso, isolando-o das paredes. A FIG 48 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se mais uma vez um pico no valor de L'_{n} em 125Hz.

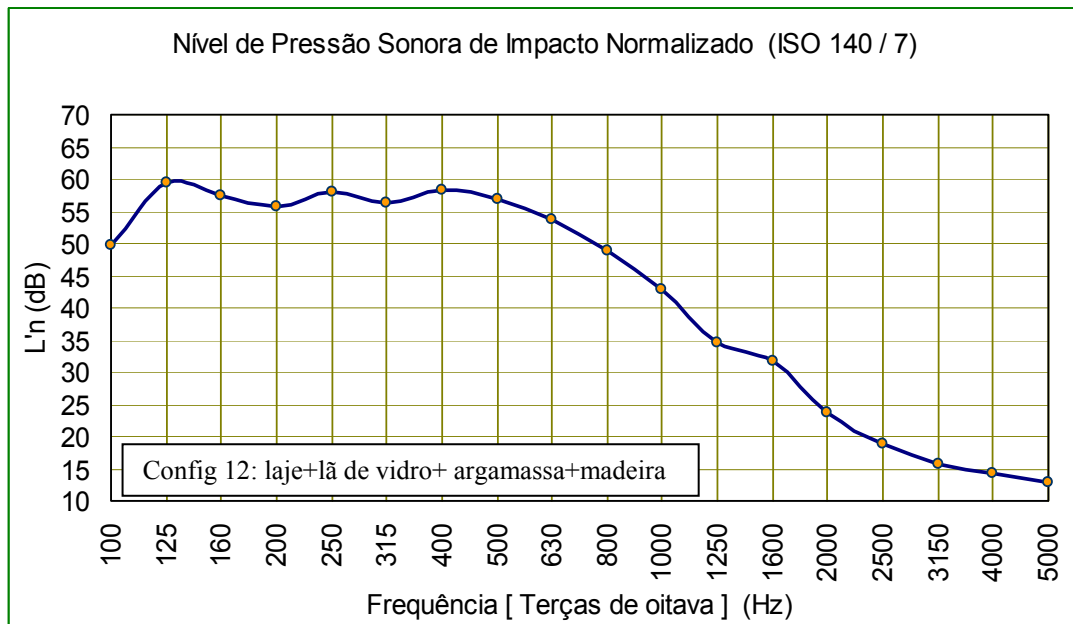


F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	51	57	54	49	45	42	40	38	35	30	26	23	22	18	15	12	9	8

L'nw = 43, C1= 1

CII = 63

FIGURA 47 – L'n da Configuração 11



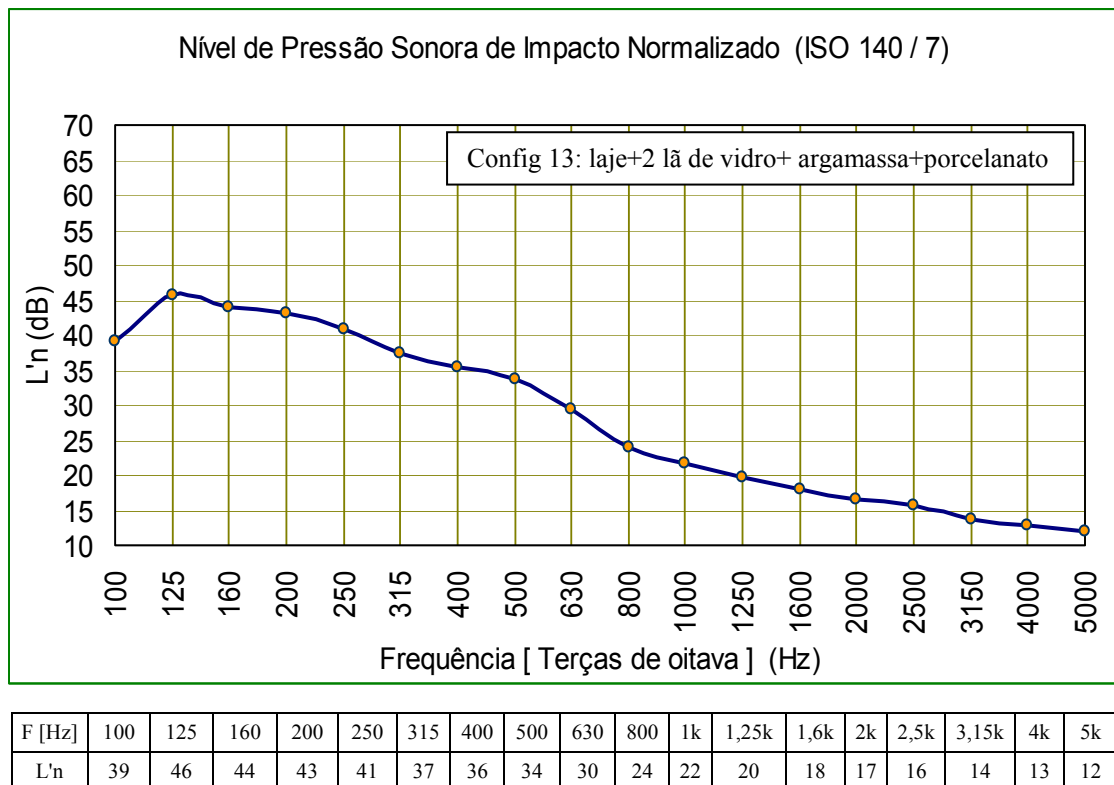
F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	50	59	57	56	58	56	58	57	54	49	43	35	32	24	19	16	14	13

L'nw = 53, C1= -2

CII = 57

FIGURA 48 – L'n da Configuração 12

A Configuração 13, constituída pela laje de 100mm, 2 mantas de lã de vidro de 15mm (30mm de espessura total), argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw}= 35$, $C1= 0$ e $CII= 74$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 44dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 49 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se mais uma vez um pico no valor de L'_{n} em 125Hz .

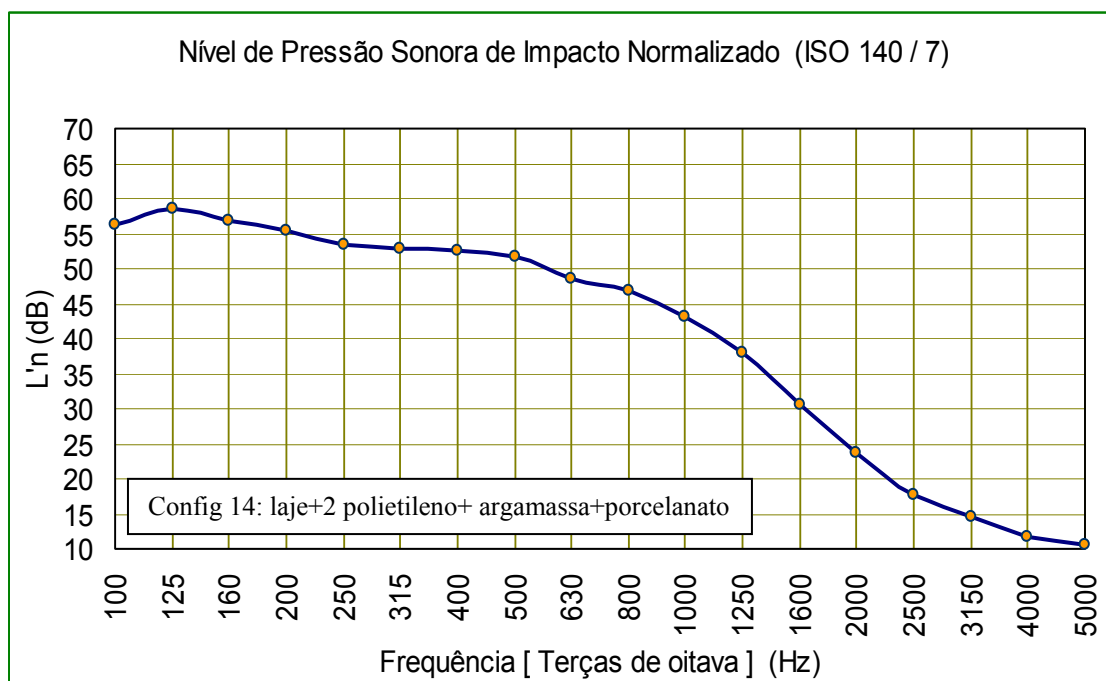


$L'_{nw} = 35, C1= 0$

$CII = 74$

FIGURA 49 – L'_{n} da Configuração 13

A Configuração 14, constituída pela laje de 100mm, 2 mantas de polietileno de 10mm, argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw}= 50$, $C1= -1$ e $CII= 60$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 29dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 50 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se um pico não tão acentuado no valor de L'_{n} em 125Hz.



F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	56	59	57	55	53	53	53	52	49	47	43	38	31	24	18	15	12	11

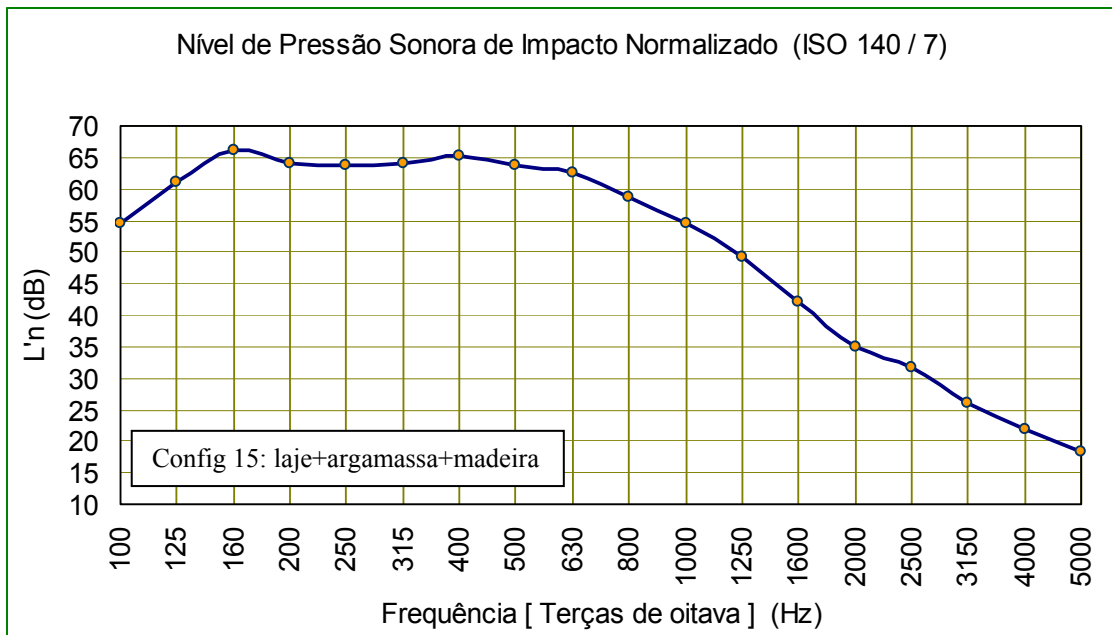
L'nw = 50, C1= -1

CII = 60

FIGURA 50 – L'n da Configuração 14

A Configuração 15, constituída pela laje de 100mm, argamassa de 40mm e piso de madeira de 19mm, alcançou $L'_{nw}= 59$, $C1= -1$ e $CII= 51$, enquadrando-se na graduação III da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 20dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 51 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Houve certa conformidade do valor de L'_{n} em 65dB de 160Hz até 630Hz.

A Configuração 16, constituída pela laje de 100mm, 2 mantas de lã de vidro de 50mm, 2 mantas de polietileno 10mm, argamassa de 40mm e porcelanato de 9mm, alcançou $L'_{nw}= 36$, $C1= -1$ e $CII= 74$, enquadrando-se na graduação I da FHA. Cabe ressaltar que esta configuração atende o limite recomendado pela norma brasileira NBR 15575-3:2008 ($L'_{nw} < 80$), estando 42dB abaixo do limite nela estabelecido. A FIG 52 mostra o Nível Sonoro de Impacto Normalizado, L'_{n} desta configuração. Ressalta-se dois picos no valor de L'_{n} , um maior em 125Hz e outro menor em 250Hz.

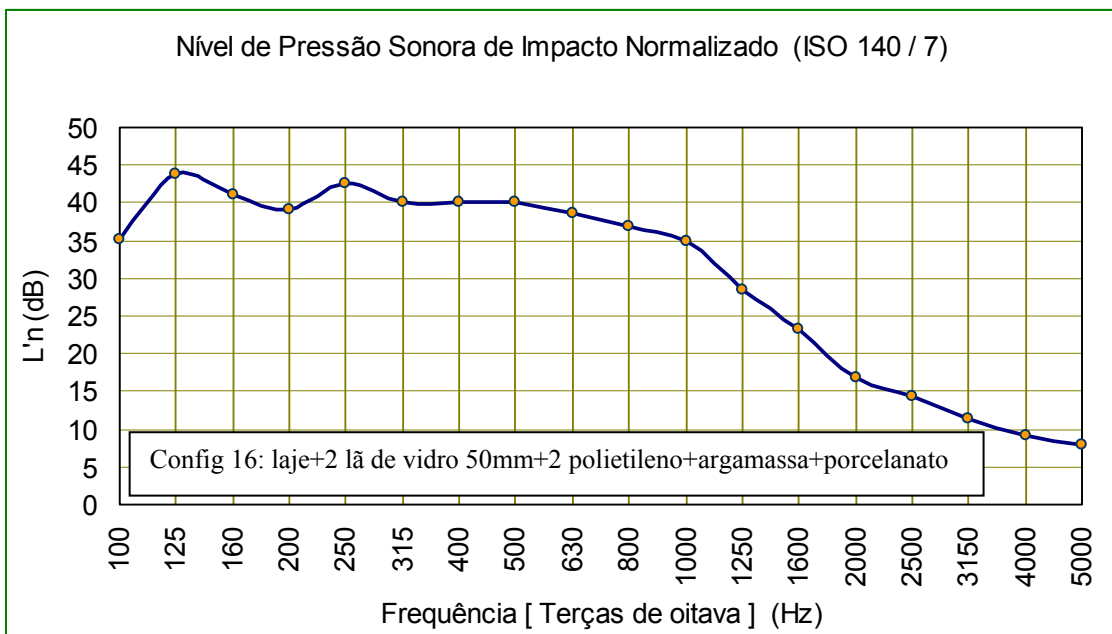


F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	55	61	66	64	64	64	65	64	62	59	55	49	42	35	32	26	22	18

L'nw = 59, C1= -1

CII = 51

FIGURA 51 – L'n da Configuração 15



F [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
L'n	35	44	41	39	43	40	40	40	39	37	35	28	23	17	14	11	9	8

L'nw = 36, C1= -1

CII = 74

FIGURA 52 – L'n da Configuração 16

A TAB 8 mostra um resumo de todos os sistemas de piso flutuante ensaiados com suas propriedades e resultados.

TABELA 8 – Resultado das medições das diferentes configurações de piso flutuante completo.

Nº. do ensaio	Data ensaio	Espessura do modelo [mm]	Composição do modelo	Ensaio com piso flutuante completamente instalados																L'nw (ISO)	C1 (ISO)	CII (ASTM)	Grad. FHA	
				L'n [dB] - f [Hz]																				
				100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k					A
1	22/10/2007	100	laje	58	66	65	64	67	67	69	68	67	65	63	59	54	47	39	32	72	63	-1	47	-
2	25/10/2007	100+15+40+9=164	laje+lã de vidro+ argamassa +porcelanato	47	55	50	48	48	50	50	50	46	38	33	28	24	18	15	12	52	44	0	66	I
3	30/10/2007	100+15+12+9=134	laje+lã de vidro+ placa cimentícia +porcelanato	51	59	50	49	44	43	40	39	34	30	27	26	24	20	18	15	47	42	3	61	I
4	7/11/2007	100+15+10+9=166	laje+lã de vidro+ placa cimentícia +porcelanato	51	59	50	50	51	48	47	44	42	39	36	33	29	23	21	18	51	45	1	61	I
5	12/11/2007	100+15+20+9=144	laje+lã de vidro+ placa cimentícia +porcelanato	48	56	49	50	51	51	49	47	46	43	40	36	32	26	21	16	53	45	0	64	I
6	19/11/2007	100+40+9=149	laje+argamassa+ porcelanato	53	62	61	63	61	63	65	65	64	62	59	56	51	43	36	33	69	60	-2	50	III
7	6/12/2007	100+15+14+9=138	laje+lã de vidro+ placa sanduiche1 +porcelanato	52	62	56	55	59	61	61	61	59	56	53	46	42	35	30	26	64	55	-1	55	I
8	10/12/2007	100+10+40=150	laje+ polietileno + argamassa	57	67	63	60	56	55	53	53	52	49	48	45	43	40	38	34	60	53	2	53	II
9	12/12/2007	100+10+40+9=159	laje+ polietileno + argamassa+porcelanato	55	65	64	61	57	57	55	54	50	47	44	41	39	36	33	29	59	54	0	55	I
10	19/12/2007	100+10+40+20=190	laje+ polietileno + argamassa+madeira	55	65	64	61	54	53	51	49	44	41	39	35	34	31	29	26	57	52	2	55	I
11	21/12/2008	100+15+14+9=138	laje+lã de vidro+ placa sanduiche2 +porcelanato	51	57	54	49	45	42	40	38	35	30	26	23	22	18	15	12	47	43	1	63	I
12	11/1/2008	100+15+40+20=175	laje+lã de vidro+ argamassa+madeira	50	59	57	56	58	56	58	57	54	49	43	35	32	24	19	16	60	53	-2	57	I
13	16/1/2008	100+30+40+9=179	laje+ 2 lâ de vidro + argamassa+porcelanato	39	46	44	43	41	37	36	34	30	24	22	20	18	17	16	14	41	35	0	74	I
14	25/1/2008	100+20+40+9=169	laje+ 2 polietileno + argamassa+porcelanato	56	59	57	55	53	53	53	52	49	47	43	38	31	24	18	15	56	50	-1	60	I
15	31/1/2008	100+40+20=160	laje argamassa+ madeira	55	61	66	64	64	64	65	64	62	59	55	49	42	35	32	26	68	59	-1	51	II
16	13/3/2008	100+100+20+40+9=269	laje+ 2 lâ de vidro 50mm + 2 polietil. +argamassa+porcelanato	35	44	41	39	43	40	40	40	39	37	35	28	23	17	14	11	45	36	-1	74	I

OBS: Placa sanduiche 1 - é o ensaio com placa sanduiche **sem** o isolamento lateral nas paredes com lâ de vidro.

Placa sanduiche 2 - é o ensaio com placa sanduiche **com** o isolamento lateral nas paredes com lâ de vidro.

5.2. Comparação entre as 16 Configurações de pisos flutuantes completos

Foram realizadas análises comparativas entre os desempenhos dos sistemas ensaiados de piso flutuante completos, para avaliar a eficiência de cada sistema e verificar a sua utilização mais apropriada.

Comparado a Configuração 3, contendo placa cimentícia de 12mm como contrapiso, com a Configuração 4, contendo placa cimentícia de 10mm como contrapiso, nota-se que não houve diferença no valor da CII ($CII=61$) entre as configurações (FIG 53). Já comparando as Configurações 4 e 5, quando se dobrou a espessura da placa cimentícia de 10mm para 20mm, houve um ganho no valor da CII passando de 61 para 64 (FIG 54).

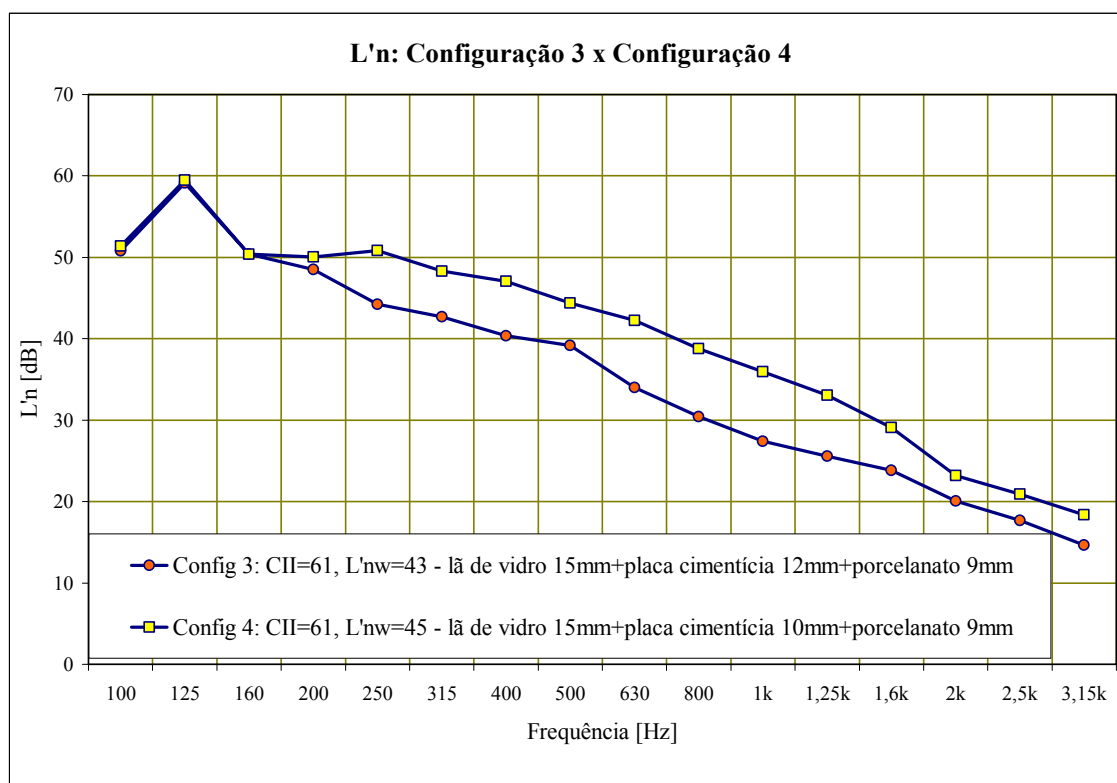


FIGURA 53 – Comparação entre as Configurações 3 e 4.

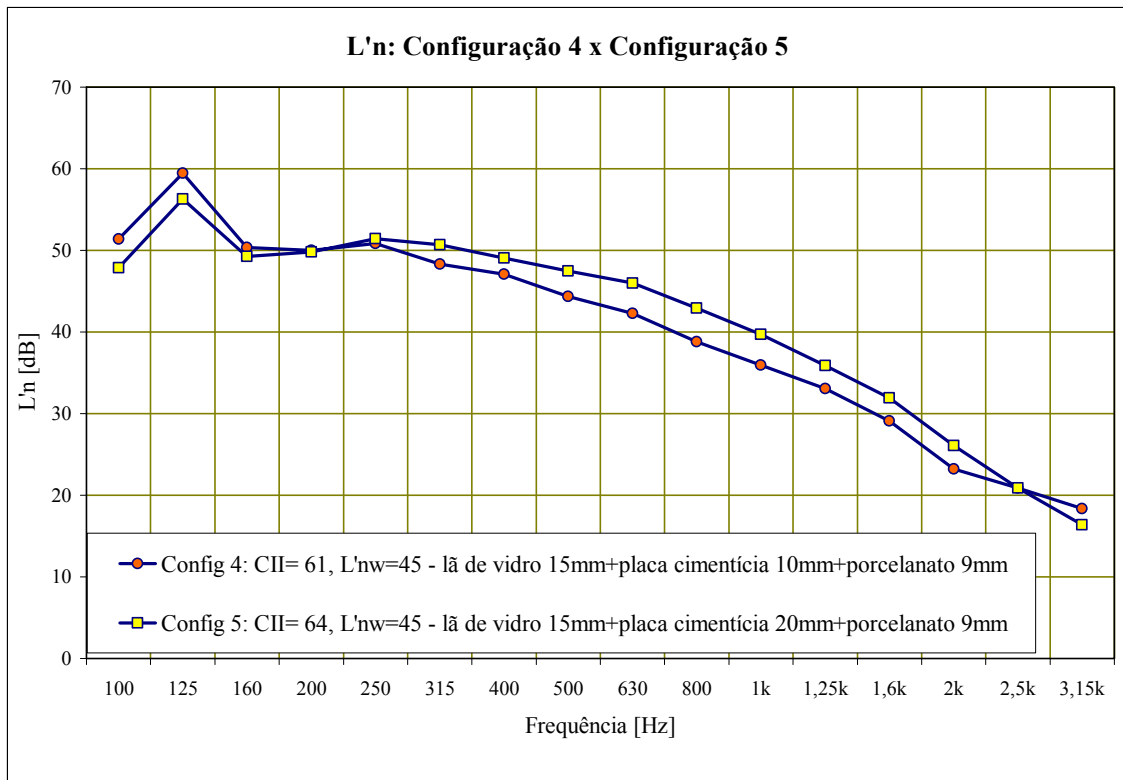


FIGURA 54 – Comparação entre as Configurações 4 e 5.

Observa-se também que, comparando as Configurações 02, com argamassa 40mm, e 05, com placa cimentícia 20mm, o valor de CII diminuiu de 66 para 64 (FIG 55). Esse resultado nos permite afirmar que embora a placa cimentícia seja menos espessa e mais leve, apresentou um valor de CII bem próximo do obtido para o contrapiso de argamassa sobre o mesmo material resiliente.

Comparando as Configurações 2 e 9 nas quais há dois sistemas semelhantes de piso flutuante, alterando apenas o material resiliente (substituindo a lâ de vidro pela manta de polietileno), foi observado que houve uma perda no valor do CII de 66 para 55. Este resultado indica que a lâ de vidro apresenta um desempenho acústico superior em relação à manta de polietileno, conforme pode ser verificado no gráfico da FIG 56.

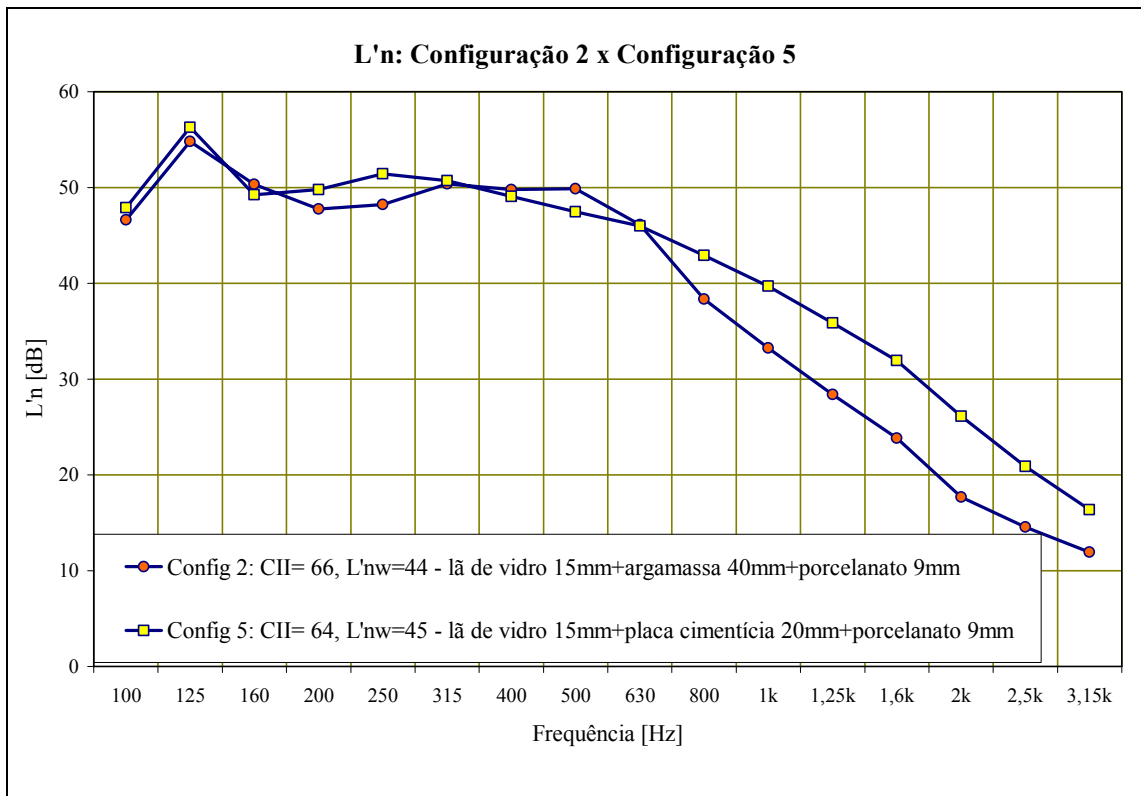


FIGURA 55 – Comparação entre as Configurações 2 e 5.

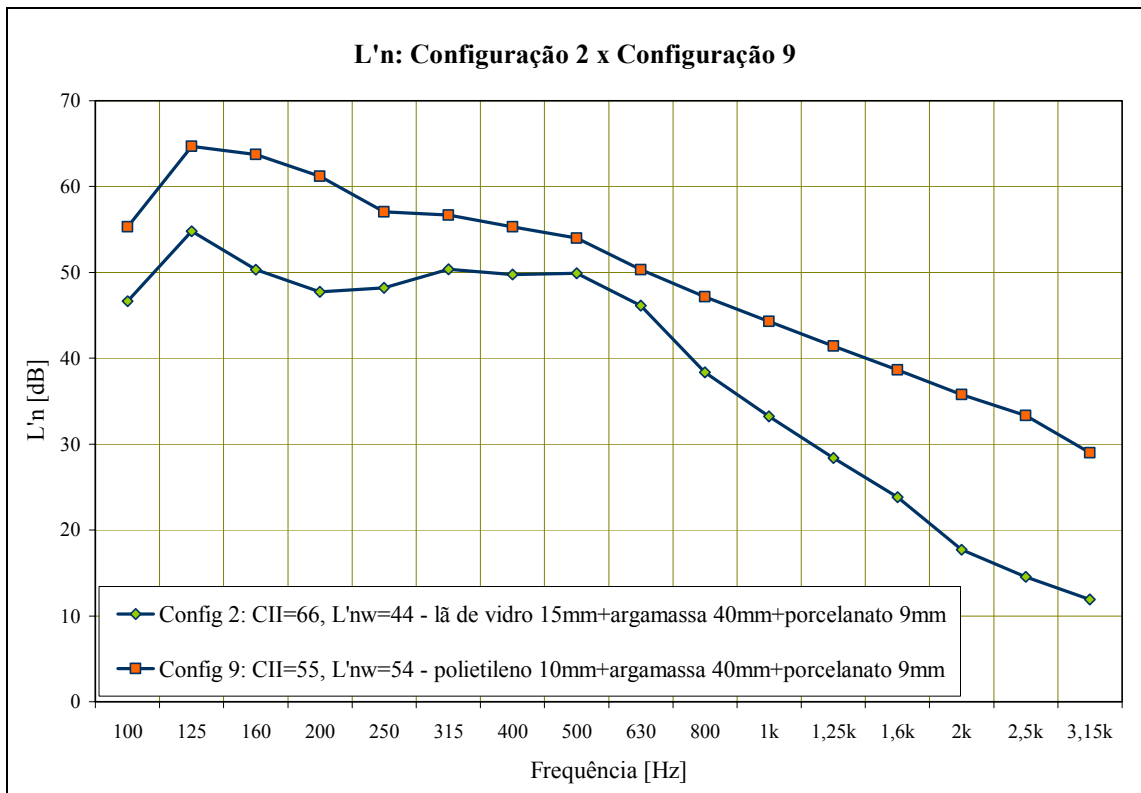


FIGURA 56 – Comparação entre as Configurações 2 e 9.

As Configurações 8, 9 e 10 permitiram comparar os mesmos sistemas de piso flutuante, alterando apenas os materiais de assoalho (FIG 57). A Configuração 8, sem assoalho, alcançou CII= 53, a Configuração 9, com assoalho de porcelanato, alcançou CII= 55, e a Configuração 10, com assoalho de madeira, alcançou CII= 55. Este resultado indica que o assoalho de porcelanato apresenta um desempenho acústico semelhante em relação ao assoalho de madeira, e indica também que a utilização do assoalho melhora o isolamento acústico do piso.

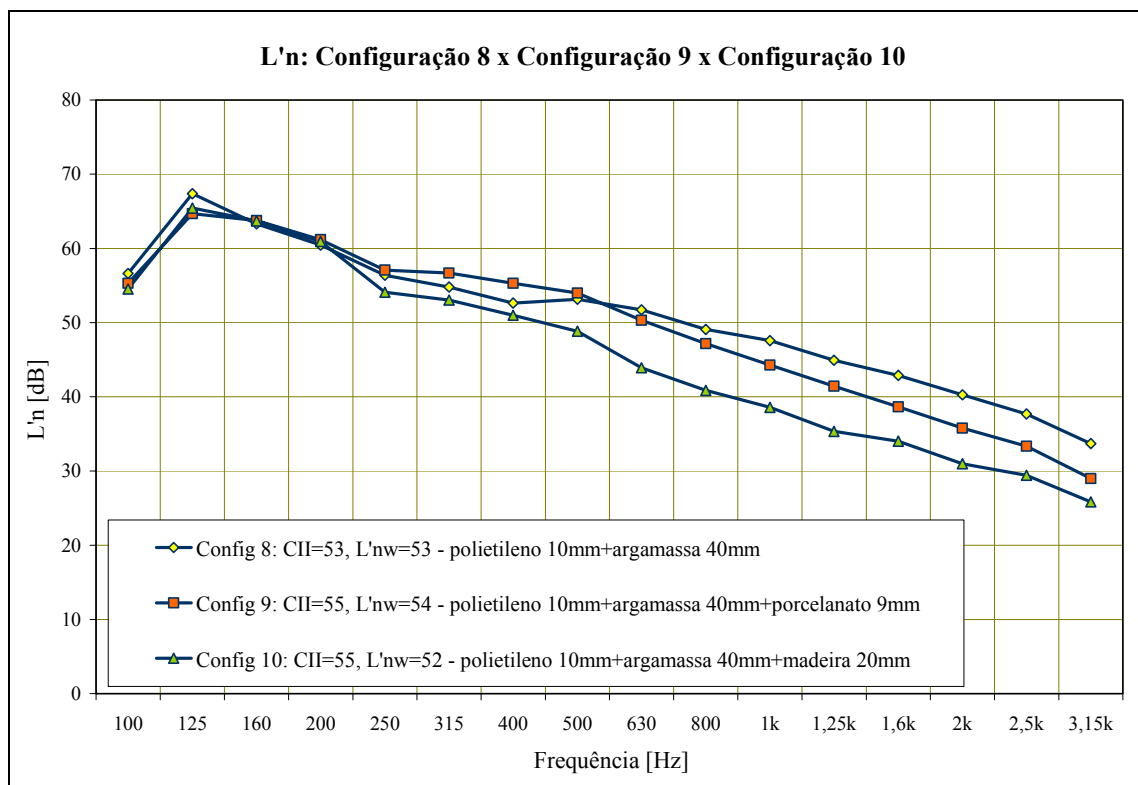


FIGURA 57 – Comparação entre as Configurações 8, 9 e 10.

Observa-se que as Configurações 7 e 11 são semelhantes, entretanto na Configuração 11 foi colocada manta de lã de vidro nas laterais do piso, isolando-o das paredes, o que não ocorre na Configuração 7 (FIG 58). Esse resultado quantifica a diferença da CII para as duas situações, comprovando a importância do isolamento entre o piso flutuante e a alvenaria. A CII= 55, Configuração 7, sem isolamento na lateral, aumentou para CII= 63, Configuração 11, com isolamento na lateral.

Cabe ressaltar que, segundo os critérios da FHA, o valor mínimo da Graduação I (CII=55) está 7 unidades acima do valor mínimo da Graduação III (CII=48).

Considerando-se que os resultados acima, com e sem o isolamento do piso flutuante em relação à alvenaria, apresentam diferença de 8 unidades entre si, isso seria correspondente ao acréscimo na qualidade do isolamento do ruído de impacto de piso similar ao obtido na adoção de um sistema com Graduação I ao invés de um com Graduação III.

Vale ressaltar também que comparando os resultados entre a placa cimentícia de 10mm, Configuração 4, ou de 12mm, Configuração 3, com a placa sanduíche de 14mm com isolamento na lateral, Configuração 11, houve um ganho no valor da CII de 61 para 63, respectivamente.

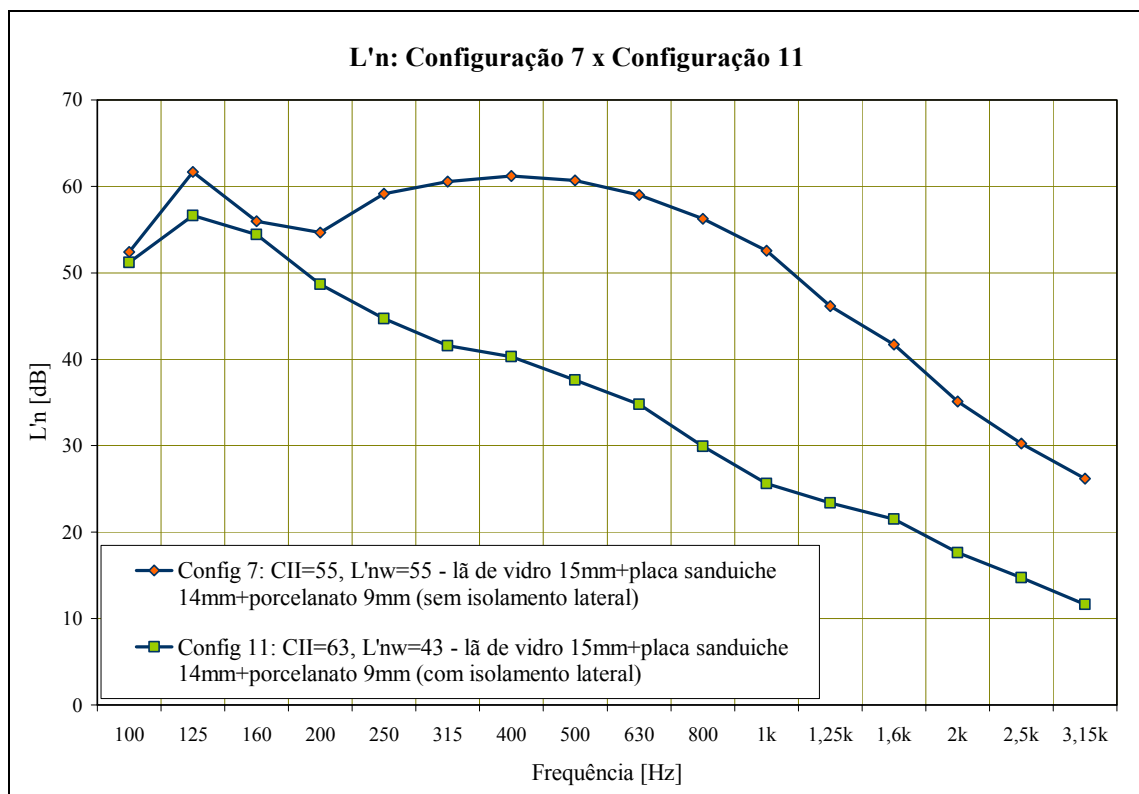


FIGURA 58 – Comparação entre as Configurações 7 e 11.

Comparando as Configurações 12 e 10, nas quais há dois sistemas semelhantes de piso flutuante, alterando apenas o material resiliente (substituindo novamente a lâ de vidro pela manta de polietileno), foi observado que houve uma perda no valor do CII de 57 para 55 (FIG 59). Este resultado reafirma que a lâ de vidro apresenta um desempenho acústico superior em relação à manta de polietileno. Cabe ressaltar que era esperado maior valor da CII na Configuração 12, uma vez que o seu desempenho mostrou ser superior ao da manta de polietileno nos demais ensaios; entretanto o piso flutuante desta

Configuração não foi devidamente isolado da alvenaria, prejudicando, portanto, o seu desempenho.

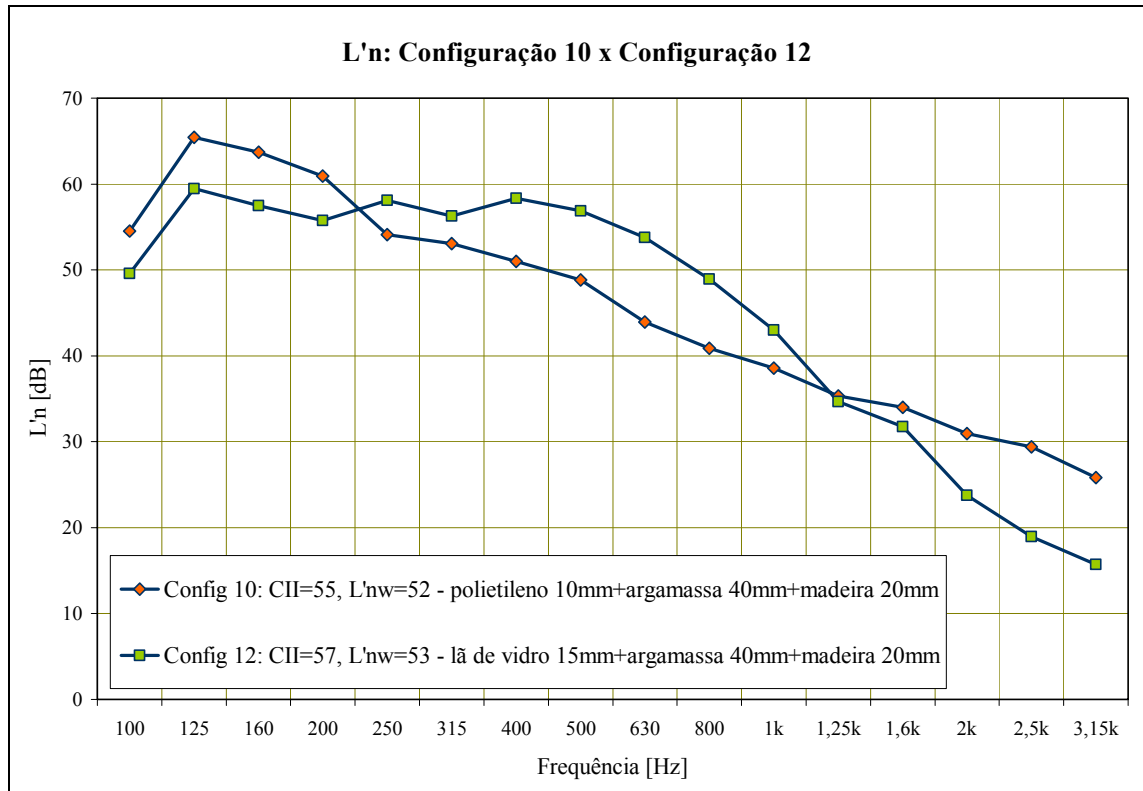


FIGURA 59 – Comparação entre as Configurações 10 e 12.

Comparando a Configuração 02, com uma camada de lã de vidro (15mm), e a Configuração 13, com duas camadas de lã de vidro (30mm), verificou-se que houve um ganho no valor da CII de 66 para 74, ou seja, dobrando a espessura da lã de vidro, houve um acréscimo de 8 no valor da CII (FIG 60).

Na comparação da Configuração 09, com uma camada de manta de polietileno (10mm), e a Configuração 14, com duas camadas desta mesma manta (20mm), houve um ganho no valor da CII de 55 para 60 (FIG 61). Observa-se que ao dobrar a espessura da manta de polietileno, houve um ganho de 5 no valor da CII, mas esse ganho foi inferior ao alcançado ao dobrar a espessura da lã de vidro (ganho de 8 no valor da CII).

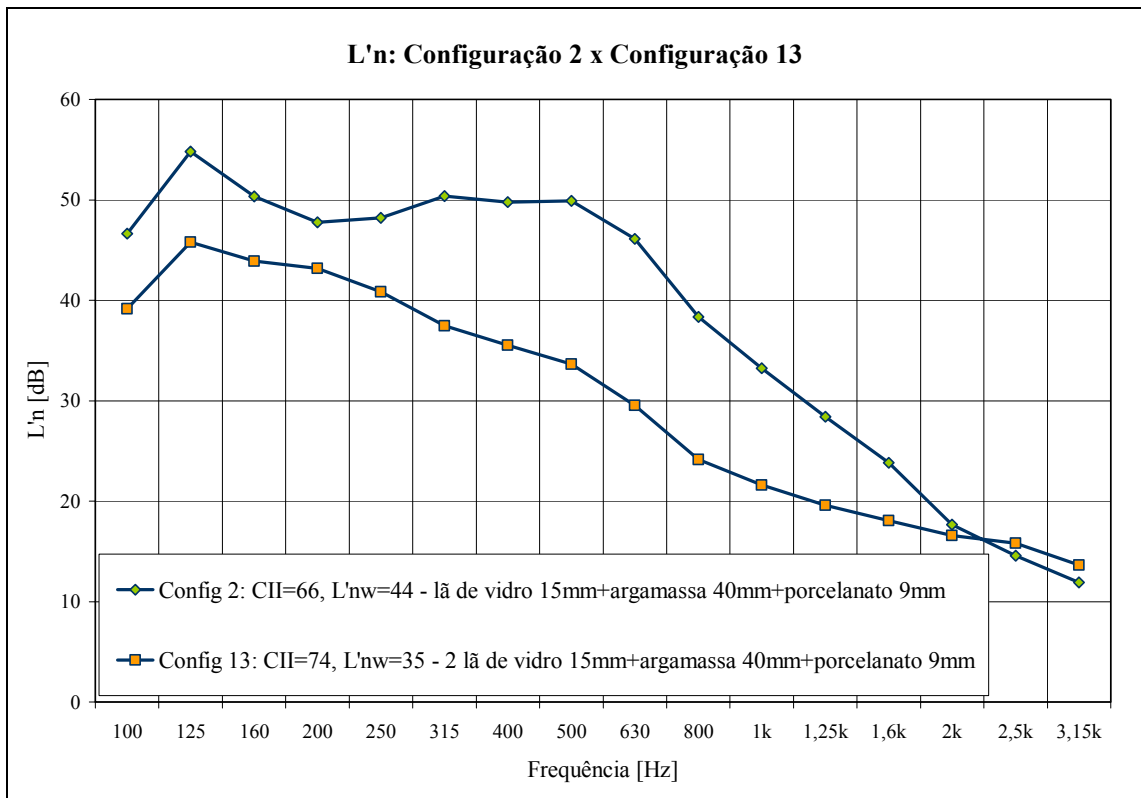


FIGURA 60 – Comparação entre as Configurações 2 e 13.

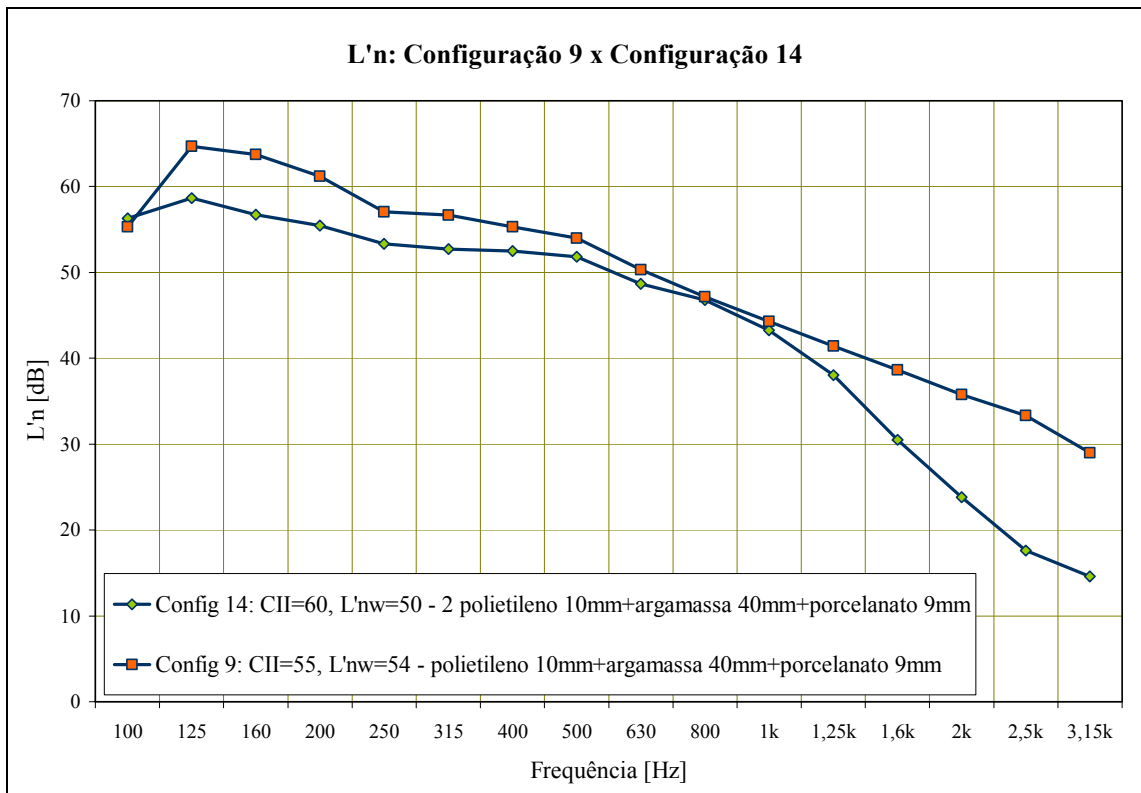


FIGURA 61 – Comparação entre as Configurações 9 e 14.

Comparando-se as Configurações 06 e 15, nas quais há dois sistemas de pisos flutuantes similares, alterando apenas os materiais de assoalho (substituindo o porcelanato pela madeira), foi observado diferença de apenas 1 unidade no valor do CII (FIG 62). Este resultado reafirma que a escolha de madeira ou porcelanato como assoalho não alteram o desempenho acústico do piso flutuante.

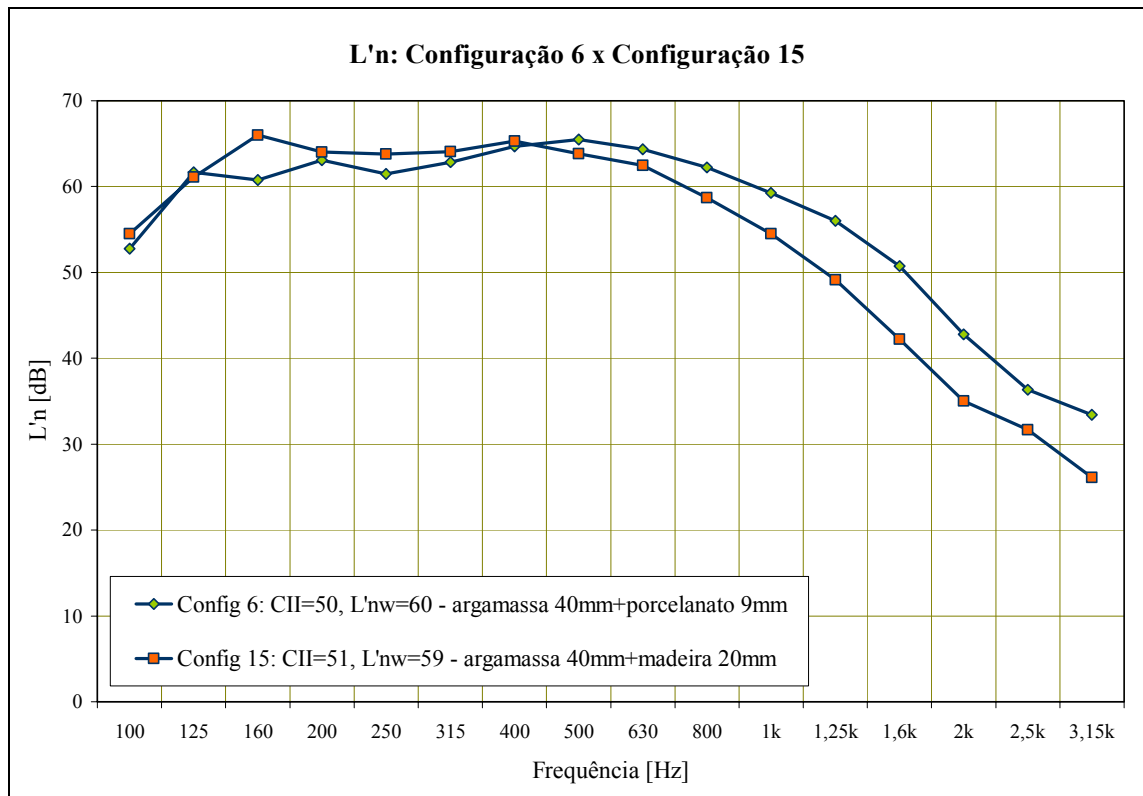


FIGURA 62 – Comparação entre as Configurações 6 e 15.

Comparando-se a Configuração 13, com 2 camadas de lã de vidro 15mm (30mm), e a Configuração 16, com 2 camadas de lã de vidro 50mm e 2 camadas de polietileno 10mm (120mm), observa-se que o valor de CII permaneceu 74 para ambas medições (FIG 63). Esse resultado mostra que, nesse caso, o aumento da espessura não melhorou o desempenho acústico do piso flutuante.

Vale ressaltar que os sistemas de piso flutuante das Configurações 13 e 16, os quais obtiveram o maior valor da CII de todas as medições de pisos flutuantes completos desta pesquisa, são apropriados para ambientes onde se requer altos níveis de isolamento, como *home theaters* e estúdios de gravação.

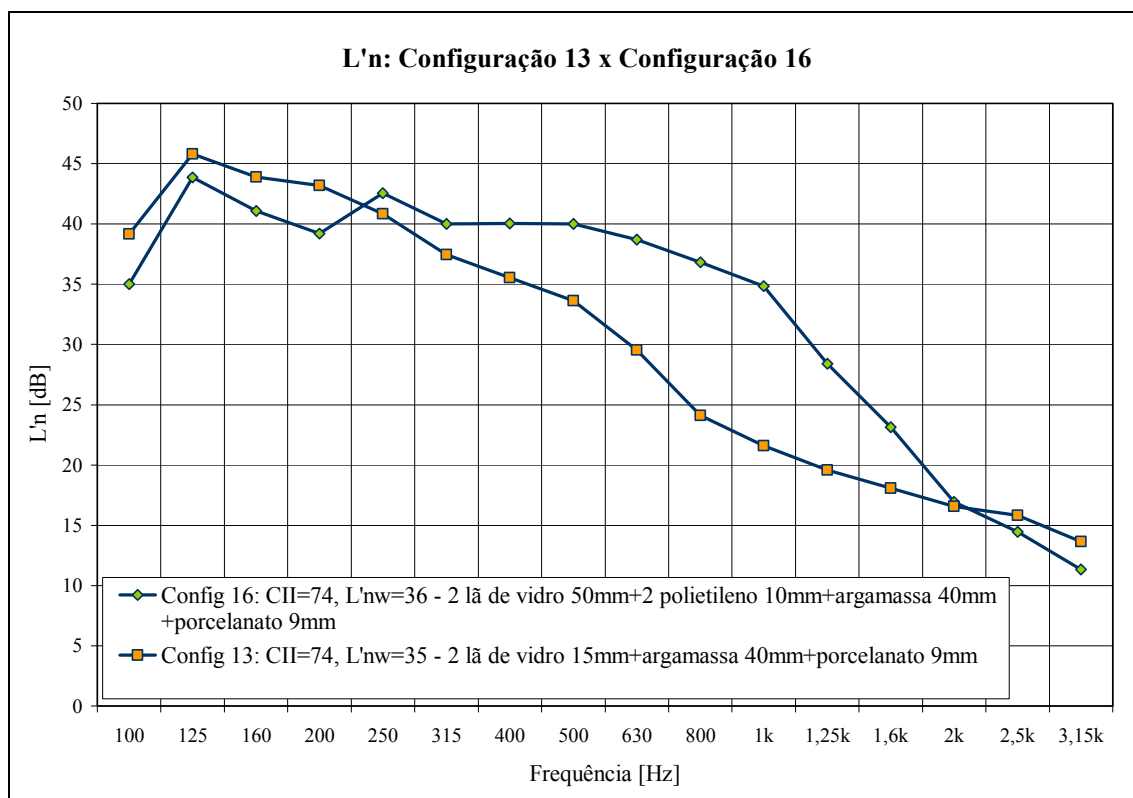


FIGURA 63 – Comparação entre as Configurações 13 e 16.

5.3. Ensaio de medição de ruído de impacto em pisos flutuantes simplificados

Como exposto no Capítulo 3, foram realizadas medições de ruído de impacto em 32 configurações, com diferentes sistemas de piso flutuante simplificados, sendo que em cada configuração o material resiliente foi alterado, enquanto a placa de concreto foi mantida como contrapiso.

A TAB 9 apresenta o resultado destas medições com os valores de $L'n$, em banda de terço de oitava, L'_{nw} , C1, CII e sua classificação segundo a FHA.

Observa-se que o Nível de Ruído de Impacto Normalizado, $L'n$, em quase todas as configurações apresenta um pico acentuado na frequência de 400Hz, provavelmente essa frequência trata-se da frequência de ressonância do sistema de piso flutuante simplificado. Essa situação não ocorre somente em 3 Configurações: a Configuração 01, constituída pela laje, 1 manta de polietileno e contrapiso, na qual ocorrem picos nas frequências de 160Hz, 200Hz e 400Hz, sendo o maior na frequência de 160Hz; a Configuração 10, constituída pela laje e contrapiso, sem nenhum material resiliente, na qual ocorrem picos nas frequências de 250Hz e 800Hz, sendo o maior na frequência de 250Hz; e a Configuração 10, constituída somente pela laje, também sem nenhum material resiliente, na qual não ocorrem picos nas frequências, sendo o maior valor de $L'n$ encontrado na frequência de 400Hz.

TABELA 9 – Resultado das medições das diferentes configurações de piso flutuante simplificado

Nº. do ensaio	Data ensaio	Espessura do modelo [mm]	Composição do modelo	Ensaio com piso flutuante simplificado																L'nw (ISO)	C1 (ISO)	CII (ASTM)	Grad. FHA	1/2
				L'n [dB] - f [Hz]																				
				100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k					
1	2/10/2007	100+10+50=160	laje+polietileno+argamassa	46	56	66	64	57	50	60	47	44	44	39	32	26	19	14	11	59	52	2	54	II
2	2/10/2007	100+15+50=165	laje+lã de vidro+argamassa	44	49	51	45	42	39	51	38	39	42	36	29	25	18	13	9	50	41	0	68	I
3	2/10/2007	100+10+15+50=175	laje+polietileno+lã de vidro+argamassa	41	46	49	45	43	39	50	38	39	42	37	29	25	18	13	10	49	40	0	69	I
4	2/10/2007	100+10+15+10+50=185	laje+polietileno+lã de vidro+polietileno+argamassa	42	45	48	45	44	39	51	38	39	42	36	29	24	18	13	10	50	40	0	68	I
5	2/10/2007	100+15+10+15+50=190	laje+lã de vidro+polietileno+lã de vidro+argamassa	39	44	45	43	41	39	50	40	39	41	36	28	23	17	13	10	49	40	-1	69	I
6	2/10/2007	100+20+15+10+50=195	laje+2 polietileno+lã de vidro+polietileno+argamassa	40	46	48	45	43	40	52	39	39	42	37	29	24	18	13	11	50	40	1	67	I
7	2/10/2007	100+20+15+20+50=205	laje+2 polietileno+lã de vidro+2 polietileno+argamassa	40	45	48	44	43	39	52	39	39	42	37	28	24	18	13	10	50	40	0	67	I
8	2/10/2007	100+20+45+20+50=235	laje+2 polietileno+3 lã de vidro+2 polietileno+argamassa	37	42	43	41	41	41	50	37	38	41	36	28	23	17	13	10	48	38	0	69	I
9	3/10/2007	100+10+50+10+50+10+50=280	laje+polietileno+lã de vidro50+polietileno+lã de vidro50+polietileno+argamassa	32	45	48	42	41	38	46	34	40	41	36	29	24	18	14	12	47	39	-1	71	I
10	3/10/2007	100	laje	56	65	63	66	68	68	69	68	69	66	66	63	59	51	44	35	74	65	-3	45	-
11	2/10/2007	100+20+15+50=185	laje+2 polietileno+lã de vidro+argamassa	40	46	47	44	42	39	50	36	37	40	37	29	25	19	15	14	48	39	0	69	I
12	2/10/2007	100+10+30+50=190	laje+polietileno+2 lã de vidro+argamassa	38	43	45	41	41	38	49	38	39	41	37	29	25	21	21	19	48	38	0	70	I
13	2/10/2007	100+30+15+50=195	laje+3 polietileno+lã de vidro+argamassa	40	45	47	44	42	38	52	36	39	42	36	29	24	19	18	16	49	39	1	67	I
14	2/10/2007	100+40+15+50=205	laje+4 polietileno+lã de vidro+argamassa	38	44	46	43	42	39	50	36	40	41	37	29	24	18	16	14	48	39	0	69	I
15	2/10/2007	100+40+50+50=240	laje+4 polietileno+lã de vidro50+argamassa	33	45	45	42	40	37	46	34	38	40	35	28	23	18	18	14	46	37	0	73	I
16	2/10/2007	100+100+20+50=270	laje+2 lã de vidro50+2 polietileno+argamassa	35	41	41	41	40	37	45	34	37	40	35	28	24	20	20	15	45	36	-1	74	I
17	2/10/2007	100+20+50+20+50=240	laje+2 polietileno+lã de vidro50+2 polietileno+argamassa	37	43	46	42	40	38	48	36	39	42	35	29	25	22	19	16	47	39	-1	71	I

Ensaio com piso flutuante simplificado																								2/2
Nº. do ensaio	Data ensaio	Espessura do modelo [mm]	Composição do modelo	L'n [dB] - f [Hz]																	L'nw (ISO)	C1 (ISO)	CII (ASTM)	Grad. FHA
				100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	A				
18	3/10/2007	100+50+20+50+50=270	laje+lã de vidro50+2 polietileno+lã de vidro50+argamassa	31	43	45	44	43	38	45	34	38	41	35	28	23	17	13	10	46	38	-1	72	I
19	3/10/2007	100+50+50=200	laje+lã de vidro50+argamassa	37	46	47	44	41	38	48	35	39	41	38	29	24	18	15	11	47	39	0	71	I
20	3/10/2007	100+50+50=200	laje+5 polietileno+argamassa	42	53	56	53	47	43	54	40	43	44	38	31	27	19	16	14	53	45	1	64	I
21	3/10/2007	100+30+30+50=210	laje+3 polietileno+2 lã de vidro+argamassa	36	46	47	44	40	38	49	36	40	42	37	29	24	18	15	13	48	40	-1	70	I
22	3/10/2007	100+30+45+50=225	laje+3 polietileno+3 lã de vidro+argamassa	35	46	48	42	40	40	48	36	38	41	38	29	25	19	16	14	47	38	1	71	I
23	3/10/2007	100+10+45+50=205	laje+polietileno+3 lã de vidro+argamassa	35	45	45	42	41	39	49	36	39	41	38	29	24	18	15	13	48	38	0	70	I
24	3/10/2007	100+20+45+50=215	laje+2 polietileno+3 lã de vidro+argamassa	37	47	48	42	41	39	48	36	39	42	38	29	25	18	14	12	47	39	0	71	I
25	3/10/2007	100+40+30+50=220	laje+4 polietileno+2 lã de vidro+argamassa	35	45	48	44	41	39	48	36	41	42	37	30	24	19	15	14	48	39	0	71	I
26	3/10/2007	100+40+60+50=250	laje+4 polietileno+4 lã de vidro+argamassa	35	44	47	43	44	42	46	35	38	40	36	30	25	19	16	16	46	39	-1	71	I
27	3/10/2007	100+30+60+50=240	laje+3 polietileno+4 lã de vidro+argamassa	34	44	47	43	44	43	48	35	39	40	37	30	25	19	15	13	47	39	0	71	I
28	3/10/2007	100+20+60+50=230	laje+2 polietileno+4 lã de vidro+argamassa	34	44	49	43	43	43	48	35	39	40	36	30	25	19	15	12	47	39	0	71	I
29	3/10/2007	100+10+60+50=220	laje+polietileno+4 lã de vidro+argamassa	35	42	45	43	43	42	49	36	37	40	36	29	24	18	14	11	47	38	0	70	I
30	3/10/2007	100+10+50+50=210	laje+polietileno+lã de vidro50+argamassa	34	47	48	44	40	37	47	34	38	41	36	29	24	18	14	12	47	39	0	71	I
31	3/10/2007	100+20+50+50=220	laje+2 polietileno+lã de vidro50+argamassa	34	48	49	44	40	37	46	34	38	41	37	29	24	18	14	12	47	40	-1	71	I
32	3/10/2007	100+15+50+15+50+15+50=295	laje+lã de vidro+lã de vidro50+lã de vidro+lã de vidro50+lã de vidro+argamassa	34	45	48	45	38	35	46	34	38	40	36	28	24	17	13	10	46	38	0	72	I

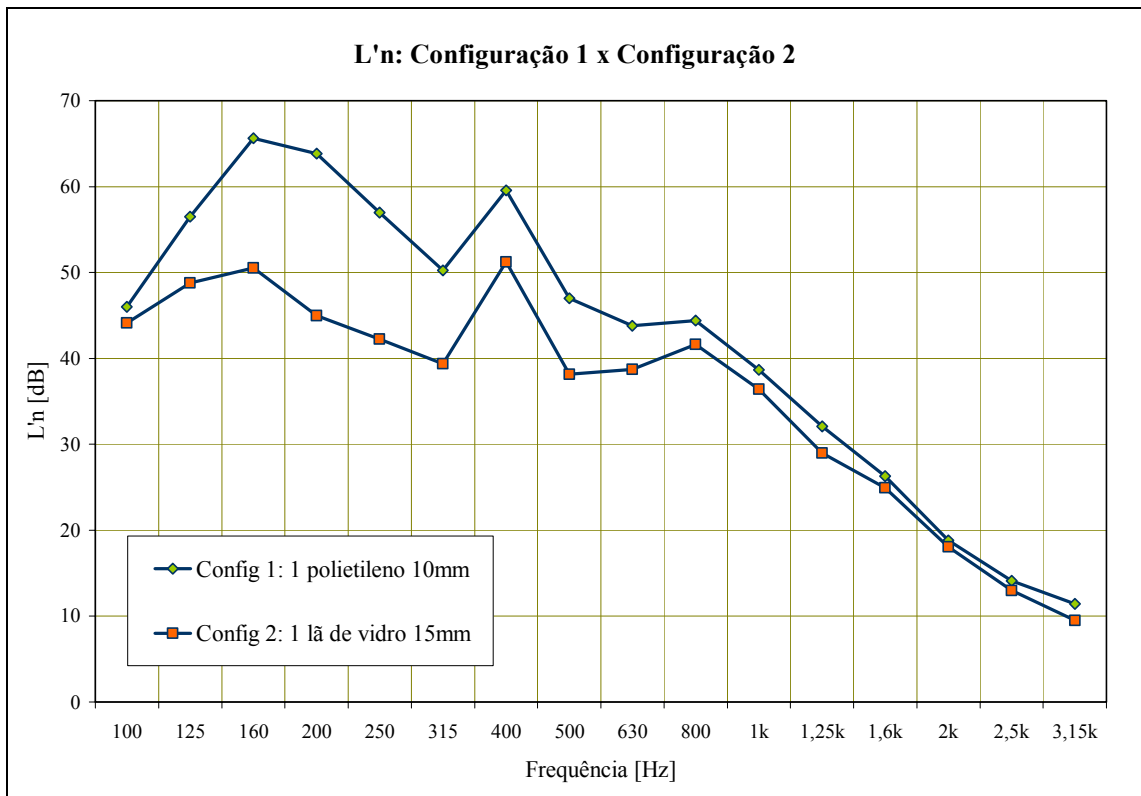


FIGURA 64 – Comparação entre as Configurações 01 e 02, dos pisos simplificados. Comparando a Configuração 01, com 1 manta de polietileno 10mm e CII= 54, e a Configuração 02, com 1 manta de lã de vidro 15mm e CII= 68, observa-se que houve um ganho no valor da CII de 14 unidades (FIG 64). Esse resultado indica um melhor desempenho da lã de vidro comparada com a manta de polietileno em relação ao isolamento de ruído de impacto de pisos.

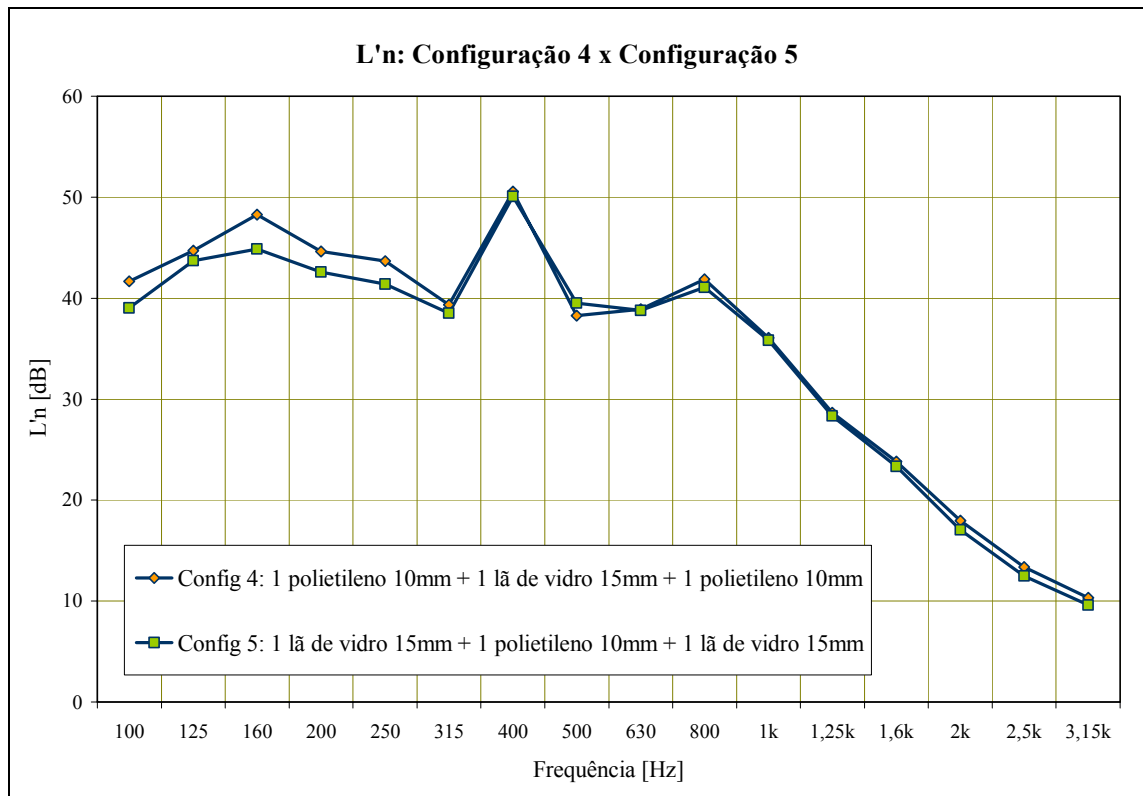


FIGURA 65 – Comparação entre as Configurações 04 e 05, dos pisos simplificados.

Já comparando a Configuração 04, com 1 manta de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm + 1 manta de polietileno 10mm (total de 35mm de espessura) e CII= 68, e a Configuração 05, com 1 manta de lã de vidro 15mm + 1 manta de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 40mm de espessura) e CII= 69, observa-se que houve um acréscimo na espessura de 5mm e no valor de CII de 1 unidade (FIG 65). A Configuração 05, com maior quantidade de lã de vidro, apresentou melhor desempenho que a Configuração 04, entretanto, a diferença no valor da CII foi de apenas uma unidade. Considerando que a diferença de comportamento esperado entre os dois sistemas deveria ser bem superior, uma vez que a lã de vidro é mais flexível que a manta de polietileno, a ressonância ocorrida em torno de 400Hz, foi aparentemente predominante na determinação do valor de CII, aproximando estes valores.

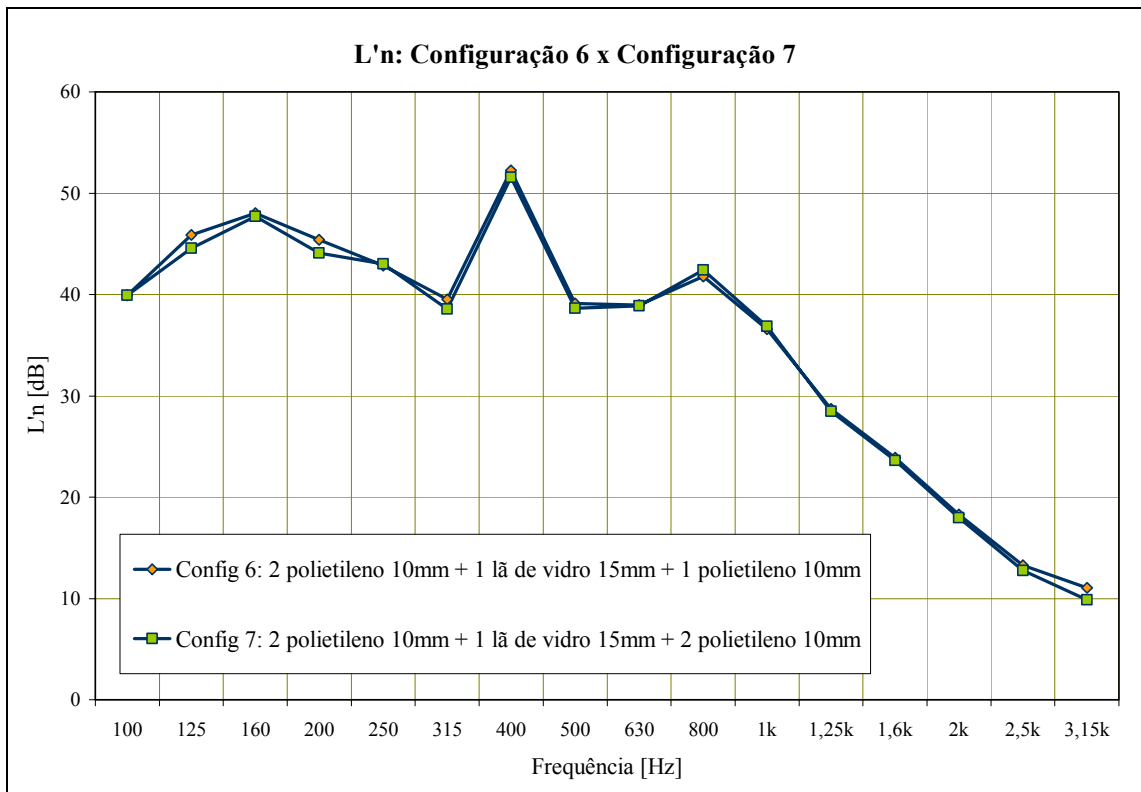


FIGURA 66 – Comparação entre as Configurações 06 e 07, dos pisos simplificados.

Comparando as Configurações 06, com 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm + 1 manta de polietileno 10mm (total de 45mm de espessura) e CII= 67, e 07, com 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm + 2 mantas de polietileno 10mm (total de 55mm de espessura) e CII= 67, observa-se que houve um acréscimo na espessura de 10mm, entretanto o valor de CII permaneceu o mesmo (FIG 66). Isso mostra que o aumento de 10mm na espessura da manta de polietileno não altera seu desempenho em relação ao isolamento de ruído de impacto de pisos.

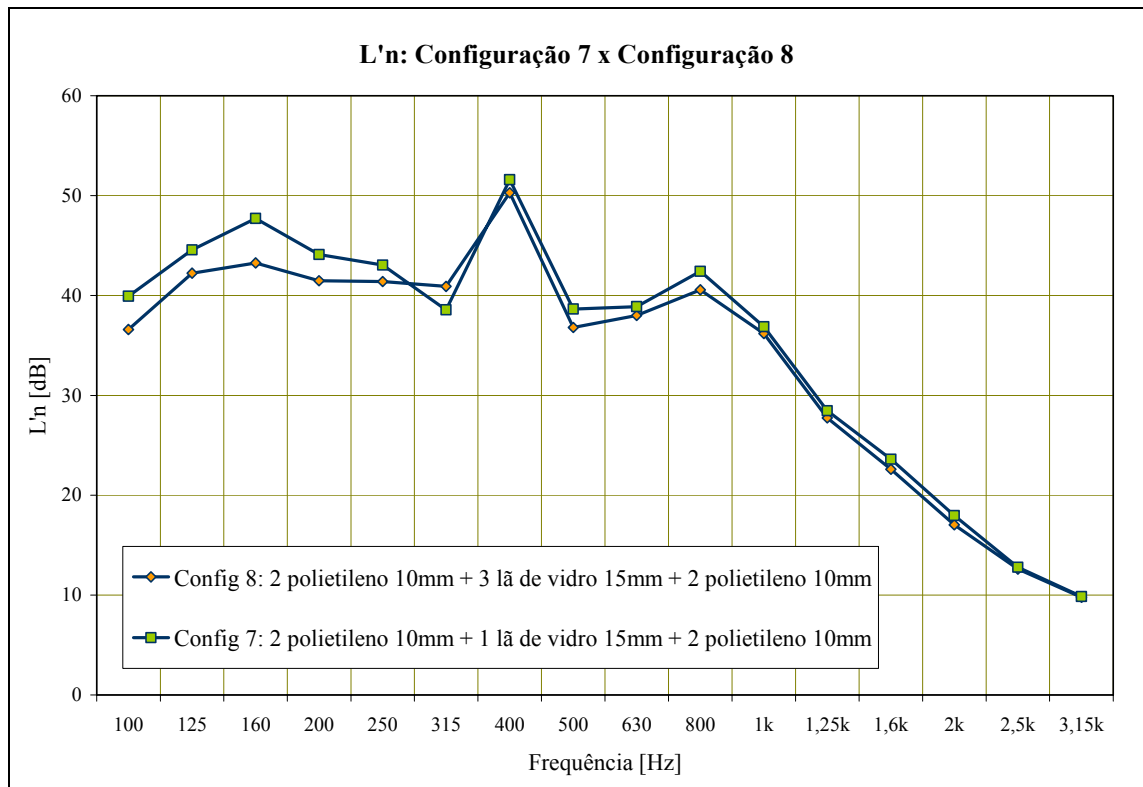


FIGURA 67 – Comparação entre as Configurações 07 e 08, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 07, com 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm + 2 mantas de polietileno 10mm (total de 55mm de espessura) e CII= 67, e a Configuração 08, com 2 mantas de polietileno 10mm + 3 mantas de lã de vidro 15mm + 2 mantas de polietileno 10mm (total de 85mm de espessura) e CII= 69, observa-se que houve um acréscimo na espessura de 30mm e no valor de CII de 2 (FIG 67). Observa-se que, neste sistema, o aumento da espessura da lã de vidro não alterou tanto o desempenho em relação ao isolamento de ruído de impacto de pisos.

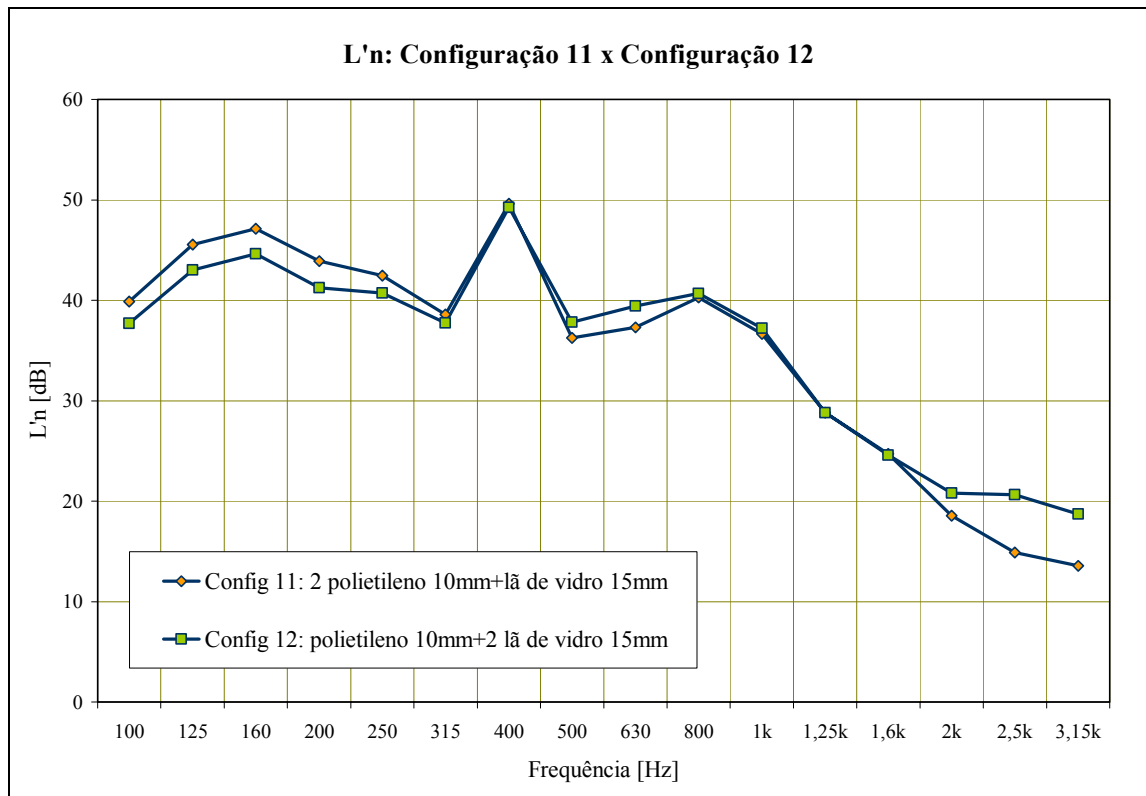


FIGURA 68 – Comparação entre as Configurações 11 e 12, dos pisos simplificados.

Comparando-se as Configurações 11, com 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 35mm de espessura) e CII= 69, e 12, com 1 manta de polietileno 10mm + 2 mantas de lã de vidro 15mm (total de 40mm de espessura) e CII= 70, observa-se que houve um acréscimo na espessura de 5mm e no valor de CII de 1 (FIG 68). Esse resultado indica a equivalência no desempenho dos dois sistemas.

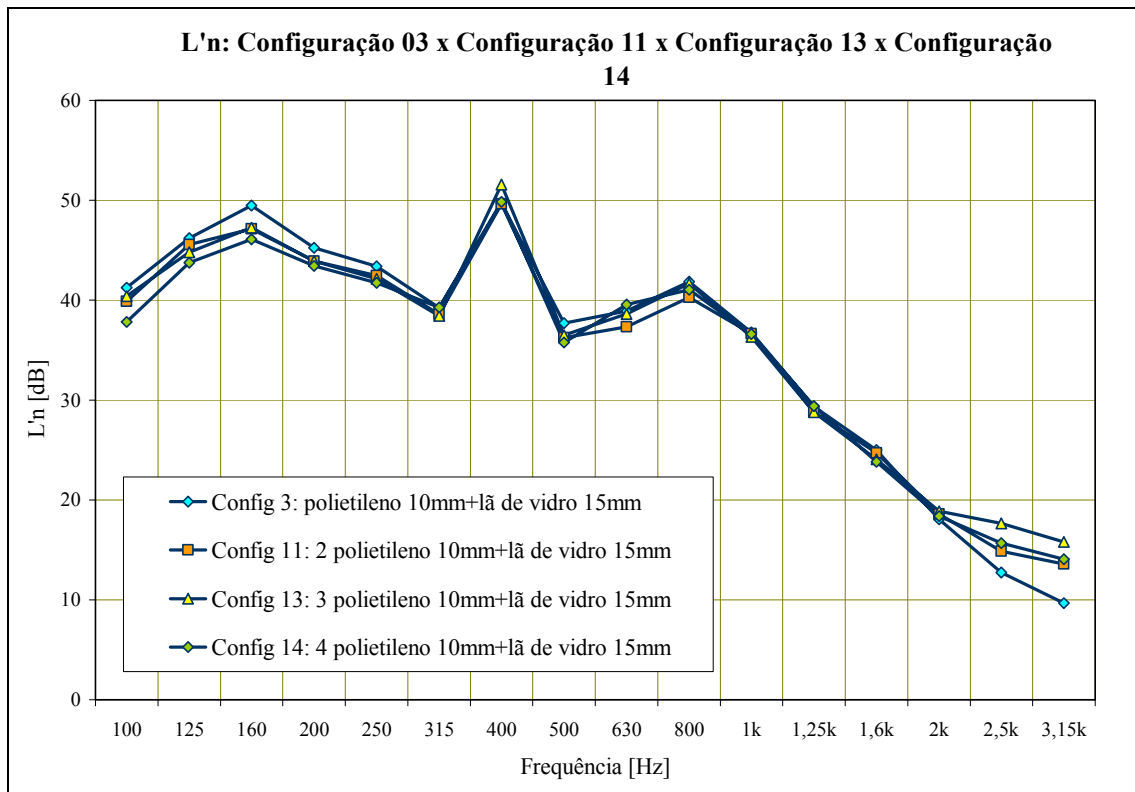


FIGURA 69 – Comparação entre as Configurações 03, 11, 13 e 14, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 03, com 1 manta de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 25mm de espessura) e CII= 69, com a Configuração 11, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 35mm de espessura) e CII= 69, com a Configuração 13, constituída por 3 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 45mm de espessura) e CII= 67, com a Configuração 14, constituída por 4 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 55mm de espessura) e CII= 69, observa-se que houve acréscimo na espessura dos sistemas, entretanto o valor de CII permaneceu praticamente o mesmo em todas estas Configurações (FIG 69). Esse resultado indica a equivalência no desempenho dos quatro sistemas e que o acréscimo da espessura da manta de polietileno não teve influência no desempenho.

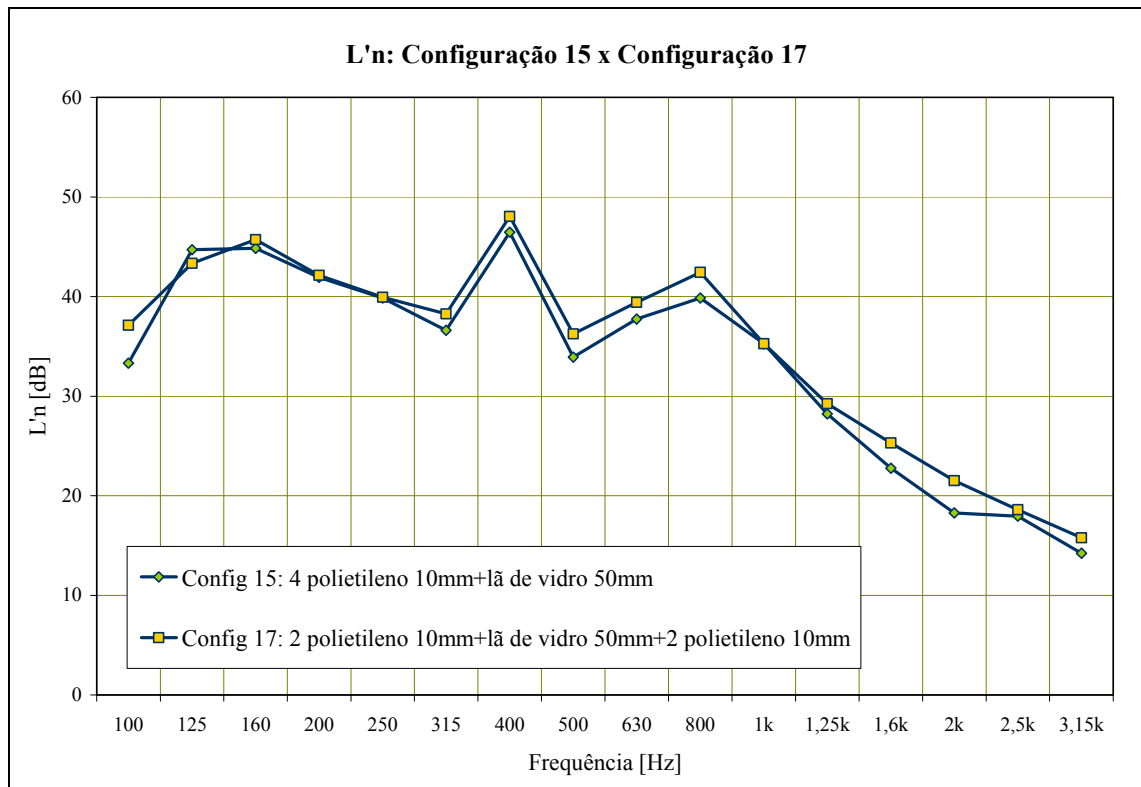


FIGURA 70 – Comparação entre as Configurações 15 e 17, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 15, constituída por 4 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 90mm de espessura) e CII= 73, com a Configuração 17, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm + 2 mantas de polietileno 10mm (total de 90mm de espessura) e CII= 71, observa-se que a espessura permaneceu a mesma, entretanto houve um decréscimo no valor de CII de 1 (FIG 70). Esse resultado indica que o sistema com as mantas de polietileno unidas apresentou um desempenho melhor que o sistema com as mesmas separadas.

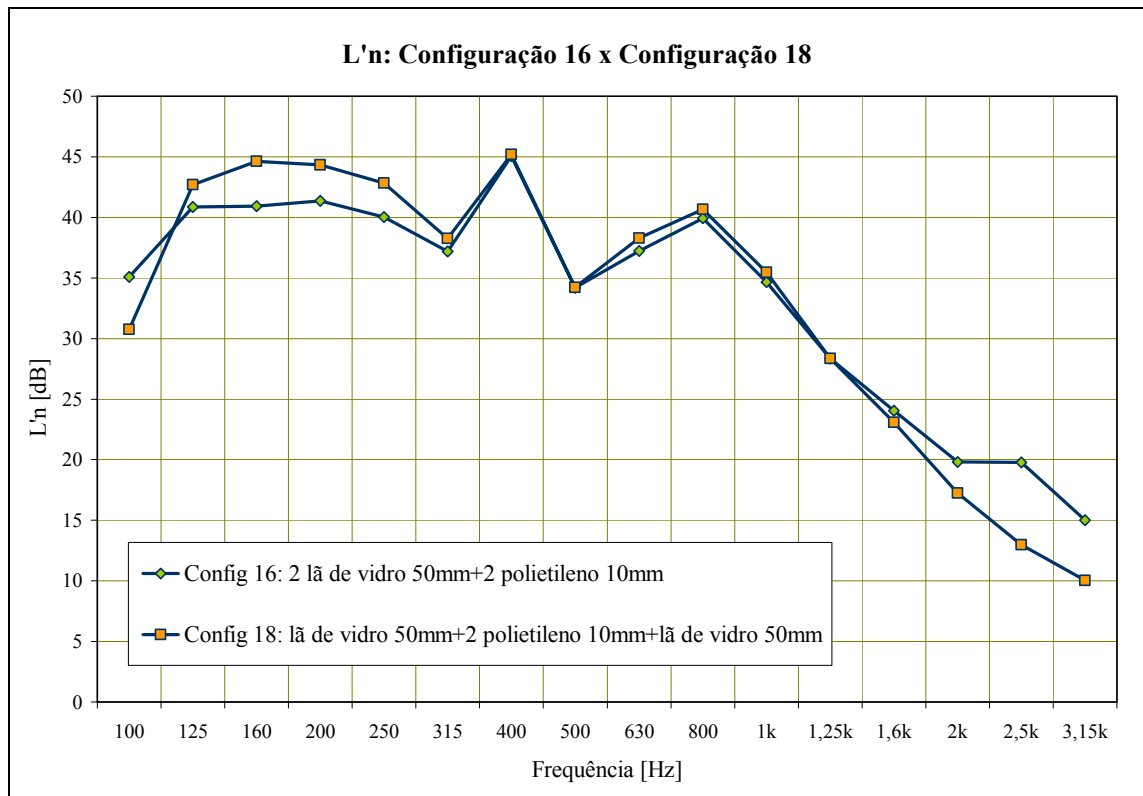


FIGURA 71 – Comparação entre as Configurações 16 e 18, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 16, constituída por 2 mantas de lã de vidro 50mm + 2 mantas de polietileno 10mm + (total de 120mm de espessura) e CII= 74, com a Configuração 18, constituída por 1 manta de lã de vidro 50mm + 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 120mm de espessura) e CII= 72, observa-se que a espessura permaneceu a mesma, entretanto houve um decréscimo no valor de CII de 2 (FIG 71). Esse resultado indica que o sistema com as mantas de lã de vidro 50mm juntas também apresentou um desempenho melhor que o sistema com as mesmas separadas.

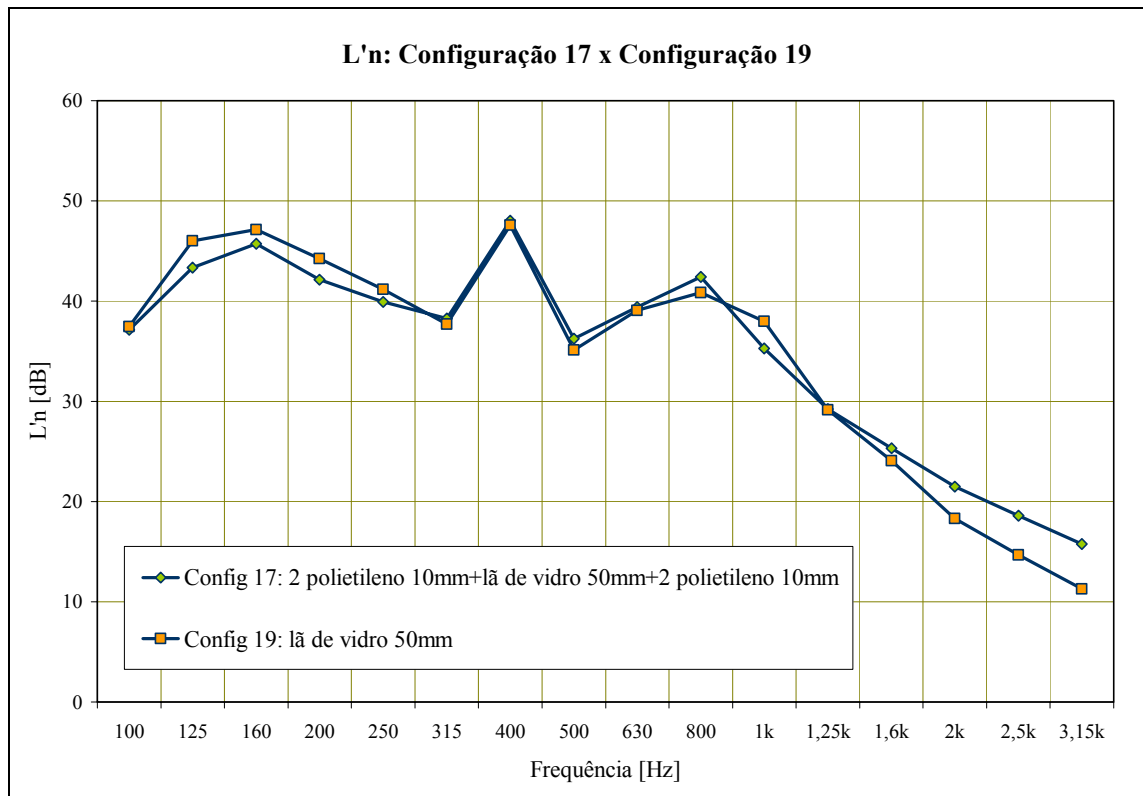


FIGURA 72 – Comparação entre as Configurações 17 e 19, dos pisos simplificados.

Comparando a Configuração 17, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm + 2 mantas de polietileno 10mm (total de 90mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 19, constituída por 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 50mm de espessura) e CII= 71, observa-se que houve um decréscimo da espessura, entretanto o valor de CII permaneceu a mesma (FIG 72). Esse resultado indica que o acréscimo das mantas de polietileno no sistema com 1 manta de lã de vidro de 50mm não alterou o desempenho do isolamento de ruído de impacto de piso.

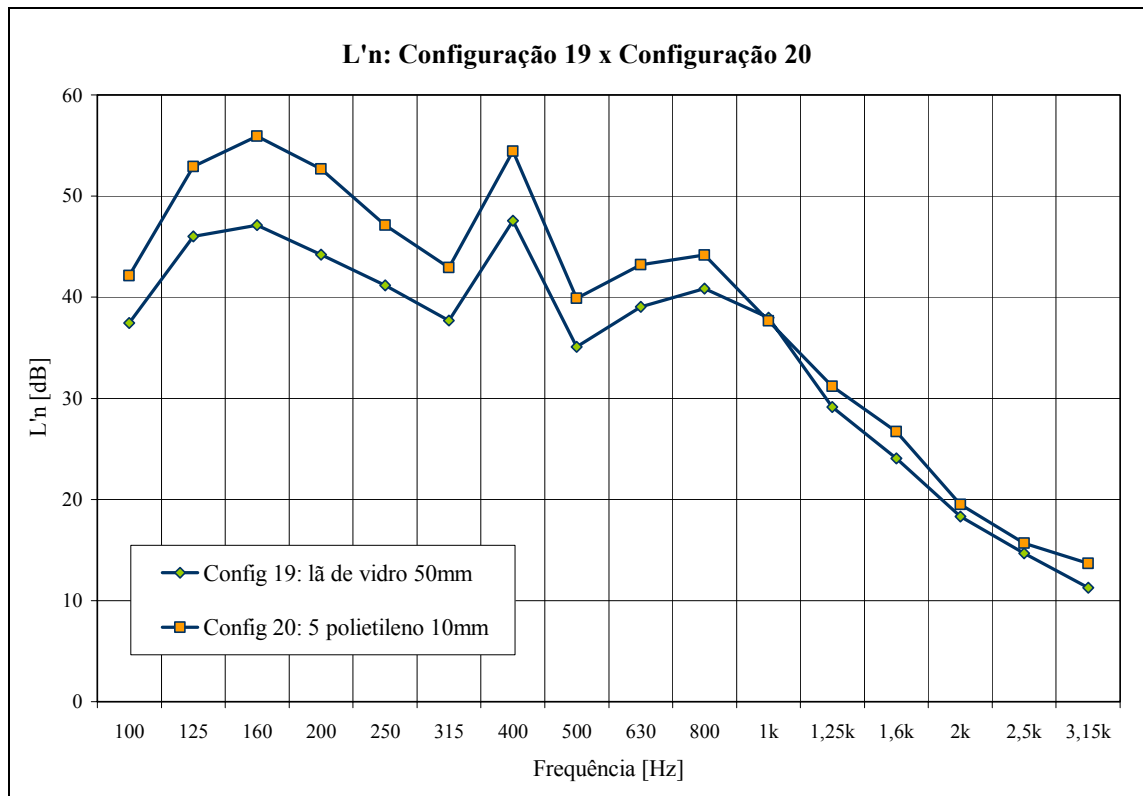


FIGURA 73 – Comparação entre as Configurações 19 e 20, dos pisos simplificados. Comparando-se a Configuração 19, constituída por 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 50mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 20, constituída por 5 mantas de polietileno 10mm (total de 50mm de espessura) e CII= 64, observa-se que a espessura permaneceu a mesma, entretanto houve um decréscimo no valor de CII de 7 (FIG 73). Esse resultado novamente indica um melhor desempenho da lã de vidro comparada com a manta de polietileno em relação ao isolamento de ruído de impacto de pisos.

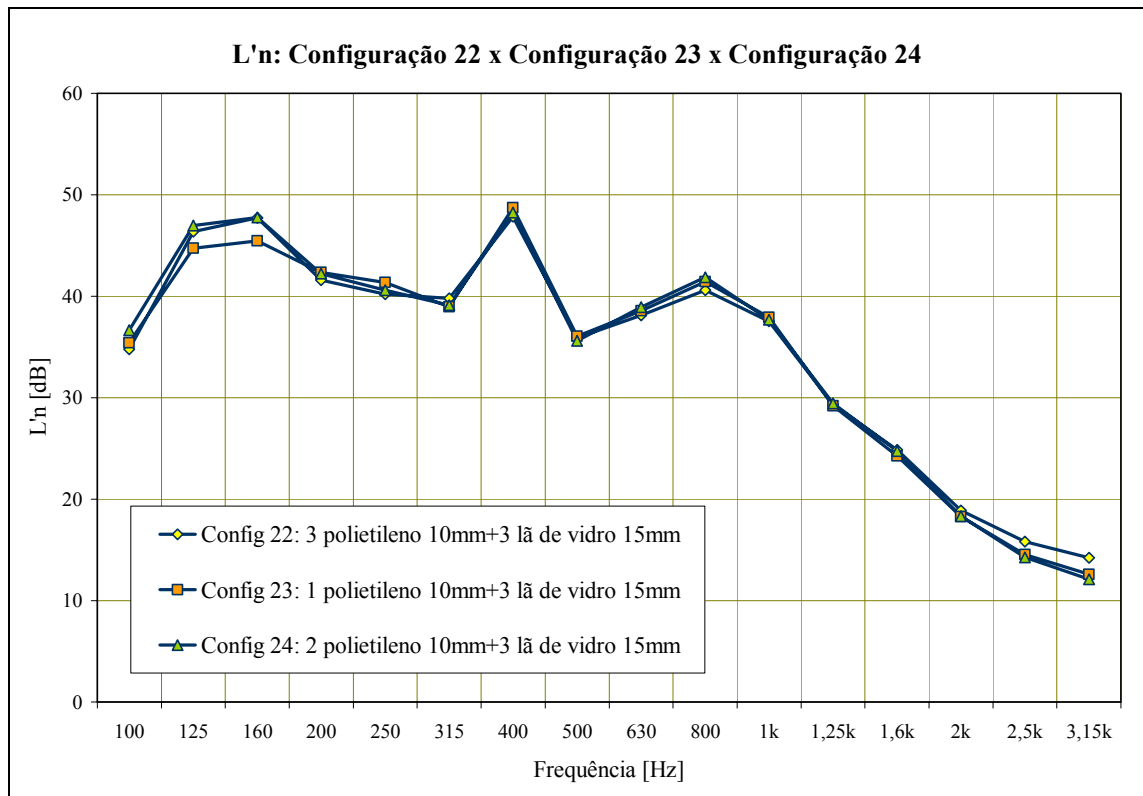


FIGURA 74 – Comparação entre as Configurações 22, 23 e 24, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 22, com 3 mantas de polietileno 10mm + 3 mantas de lã de vidro 15mm (total de 75mm de espessura) e CII= 70, com a Configuração 23, constituída por 1 manta de polietileno 10mm + 3 mantas de lã de vidro 15mm (total de 55mm de espessura) e CII= 70, e a Configuração 24, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 3 mantas de lã de vidro 15mm (total de 65mm de espessura) e CII= 71, observa-se que houve acréscimo na espessura dos sistemas, entretanto o valor de CII permaneceu praticamente o mesmo em todas estas Configurações (FIG 74). Este resultado mostra novamente que o aumento na espessura da manta de polietileno não altera seu desempenho.

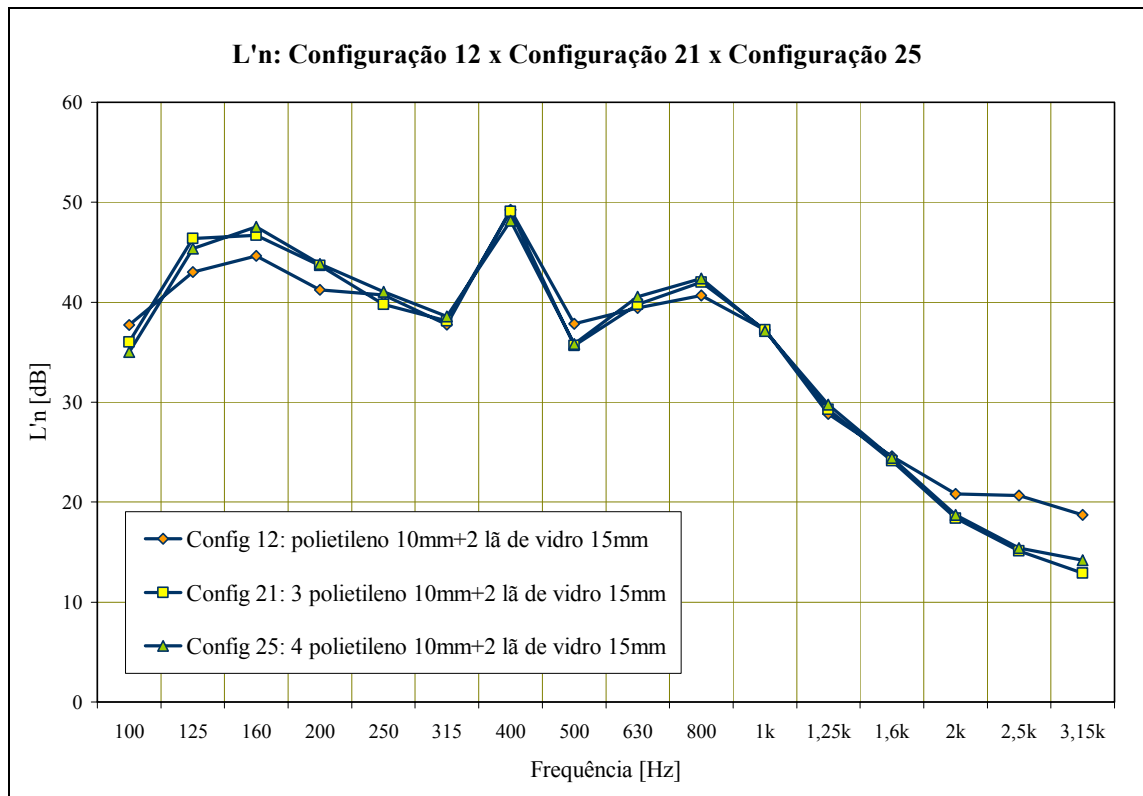


FIGURA 75 – Comparação entre as Configurações 12, 21 e 25, dos pisos simplificados.

Comparando a Configuração 12, com 1 manta de polietileno 10mm + 2 mantas de lã de vidro 15mm (total de 40mm de espessura) e CII= 70, com a Configuração 21, constituída por 3 mantas de polietileno 10mm + 2 mantas de lã de vidro 15mm (total de 60mm de espessura) e CII= 70, e a Configuração 25, constituída por 4 mantas de polietileno 10mm + 3 mantas de lã de vidro 15mm (total de 70mm de espessura) e CII= 71, observa-se que houve acréscimo na espessura dos sistemas, entretanto o valor de CII permaneceu praticamente o mesmo em todas estas Configurações (FIG 75). Este resultado indica novamente que o aumento na espessura da manta de polietileno não altera seu desempenho.

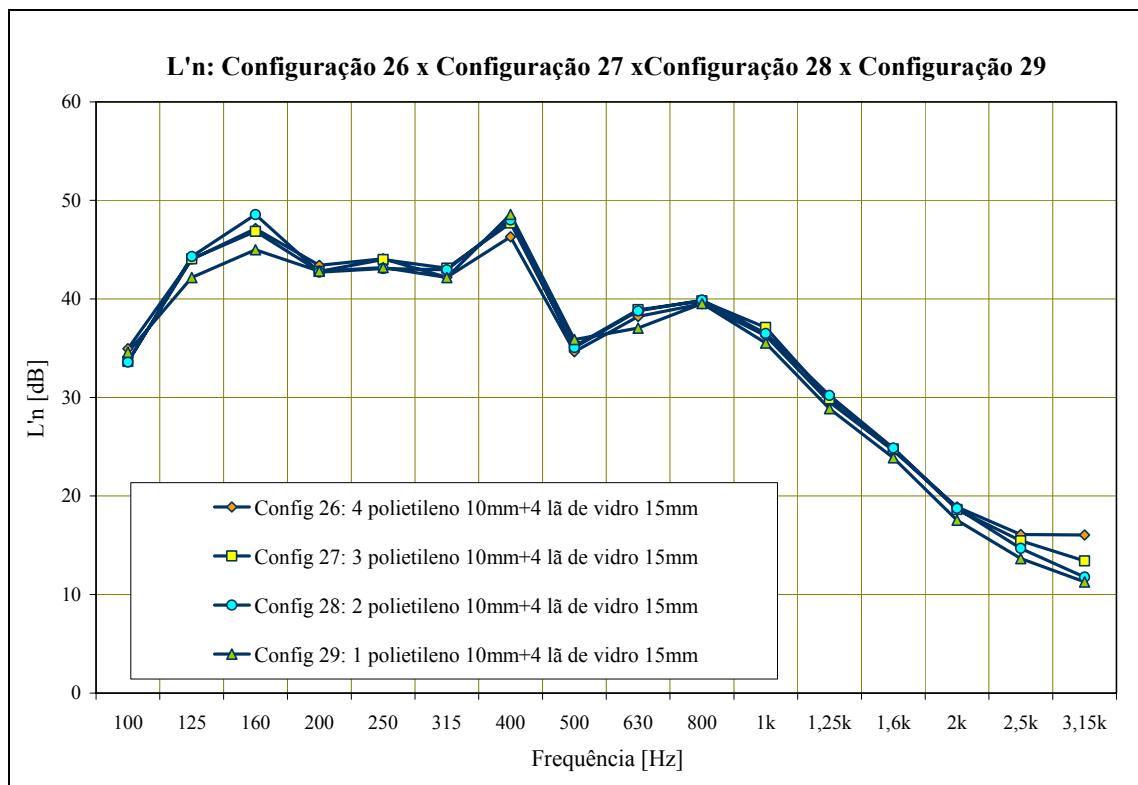


FIGURA 76 – Comparação entre as Configurações 26, 27, 28 e 29, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 26, com 4 mantas de polietileno 10mm + 4 mantas de lã de vidro 15mm (total de 100mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 27, constituída por 3 mantas de polietileno 10mm + 4 mantas de lã de vidro 15mm (total de 90mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 28, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 4 mantas de lã de vidro 15mm (total de 80mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 29, constituída por 1 manta de polietileno 10mm + 4 mantas de lã de vidro 15mm (total de 70mm de espessura) e CII= 70, observa-se que houve decréscimo na espessura dos sistemas, entretanto o valor de CII permaneceu praticamente o mesmo em todas estas Configurações (FIG 76). Este resultado indica novamente que o aumento na espessura da manta de polietileno não altera seu desempenho.

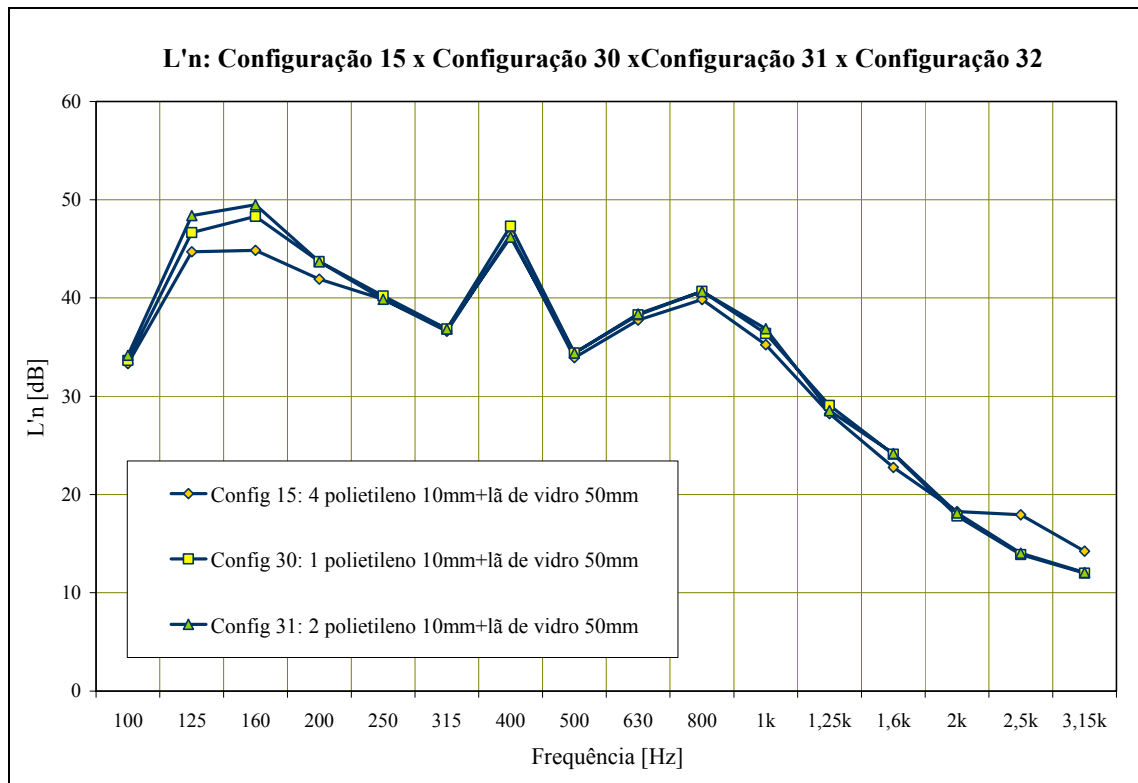


FIGURA 77 – Comparação entre as Configurações 15, 30 e 31, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 15, com 4 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 90mm de espessura) e CII= 73, com a Configuração 30, constituída por 1 manta de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 60mm de espessura) e CII= 71, e a Configuração 31, constituída por 2 mantas de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm (total de 70mm de espessura) e CII= 71, observa-se que houve decréscimo na espessura dos sistemas, entretanto o valor de CII permaneceu praticamente o mesmo em todas estas Configurações (FIG 77). Este resultado mostra que, embora tenha havido uma pequena diferença nos valores da CII, esta não foi significativa, indicando mais uma vez que o aumento na espessura da manta de polietileno não altera seu desempenho.

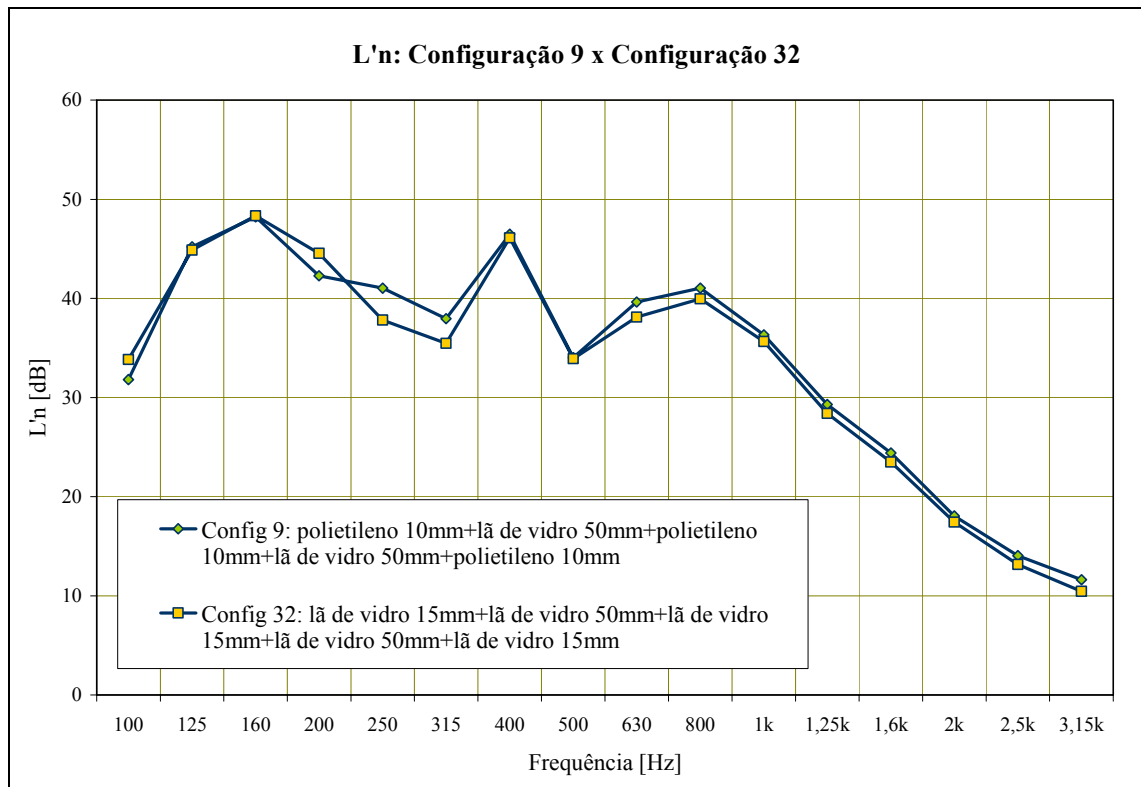


FIGURA 78 – Comparação entre as Configurações 9 e 32, dos pisos simplificados.

Comparando-se a Configuração 9, constituída por 1 manta de polietileno 10mm+ 1 manta de lã de vidro 50mm + 1 manta de polietileno 10mm + 1 manta de lã de vidro 50mm + 1 manta de polietileno 10mm (total de 130mm de espessura) e CII= 71, com a Configuração 32, constituída por 1 manta de lã de vidro 15mm + 1 manta de lã de vidro 50mm + 1 manta de lã de vidro 15mm + 1 manta de lã de vidro 50mm + 1 manta de lã de vidro 15mm (total de 145mm de espessura) e CII= 72, observa-se que o valor da CII permaneceu praticamente o mesmo (FIG 78). Esse resultado novamente indica que o acréscimo da espessura não alterou o desempenho em relação ao isolamento de ruído de impacto de pisos.

Ressalta-se que o sistema da Configuração 16 obteve melhor desempenho que os das Configurações 9 e 32 embora sua espessura seja inferior.

5.4. Comparação entre metodologias: Pisos flutuantes simplificados e Pisos flutuantes completos (ISO 140-7)

Conforme exposto no Item 4.4.5 neste trabalho, foram desenvolvidos procedimentos metodológicos para avaliar o ruído de impacto de pisos, por meio de pisos simplificados, utilizando uma placa de concreto maciça como contrapiso, de dimensões de 1m x 1m e 5cm de espessura. Dessa forma, apresenta-se a seguir uma comparação entre resultados obtidos com a metodologia simplificada e a metodologia conforme ISO 140-7. Dentre os ensaios realizados, houve 4 configurações avaliadas tanto pela ISO 140-7, com pisos flutuantes completos, quanto pela metodologia proposta neste trabalho, com os pisos flutuantes simplificados (TAB 10 e 11).

TABELA 10 – Comparação dos valores de CII entre sistemas de pisos flutuantes completos e simplificados

Piso Simplificado		Piso Completo	
Descrição	CII	CII	Descrição
Config 1- Laje + Polietileno10mm + Contrapiso50mm	54	55	Config 9- Laje + Polietileno10mm + Argamassa 40mm + Porcelanato 9mm
Config 2- Laje + Lã de Vidro15mm + Contrapiso50mm	68	66	Config 2- Laje + Lã de Vidro15mm + Argamassa40mm + Porcelanato9mm
+ 2Polietileno10mm + Contrapiso 50mm	74	74	2Polietileno10mm + Argamassa 40mm + Porcelanato 9mm
Config 10- Laje 100mm	45	47	Config 1- Laje 100mm

TABELA 11 – Comparação dos valores de L'nw entre sistemas de pisos flutuantes completos e simplificados

Piso Simplificado		Piso Completo	
Descrição	L'nw	L'nw	Descrição
Config 1- Laje + Polietileno10mm + Contrapiso50mm	52	54	Config 9- Laje + Polietileno10mm + Argamassa 40mm + Porcelanato 9mm
Config 2- Laje + Lã de Vidro15mm + Contrapiso50mm	41	44	Config 2- Laje + Lã de Vidro15mm + Argamassa40mm + Porcelanato9mm
+ 2Polietileno10mm + Contrapiso 50mm	36	36	2Polietileno10mm + Argamassa 40mm + Porcelanato 9mm
Config 10- Laje 100mm	65	63	Config 1- Laje 100mm

Nos resultados apresentados nas tabelas acima, observa-se que em todas as 4 comparações os valores de CII e L'nw ficaram bastante próximos.

A seguir são apresentados gráficos comparativos dos valores de $L'n$ por banda de terço de oitava, para cada sistema equivalente.

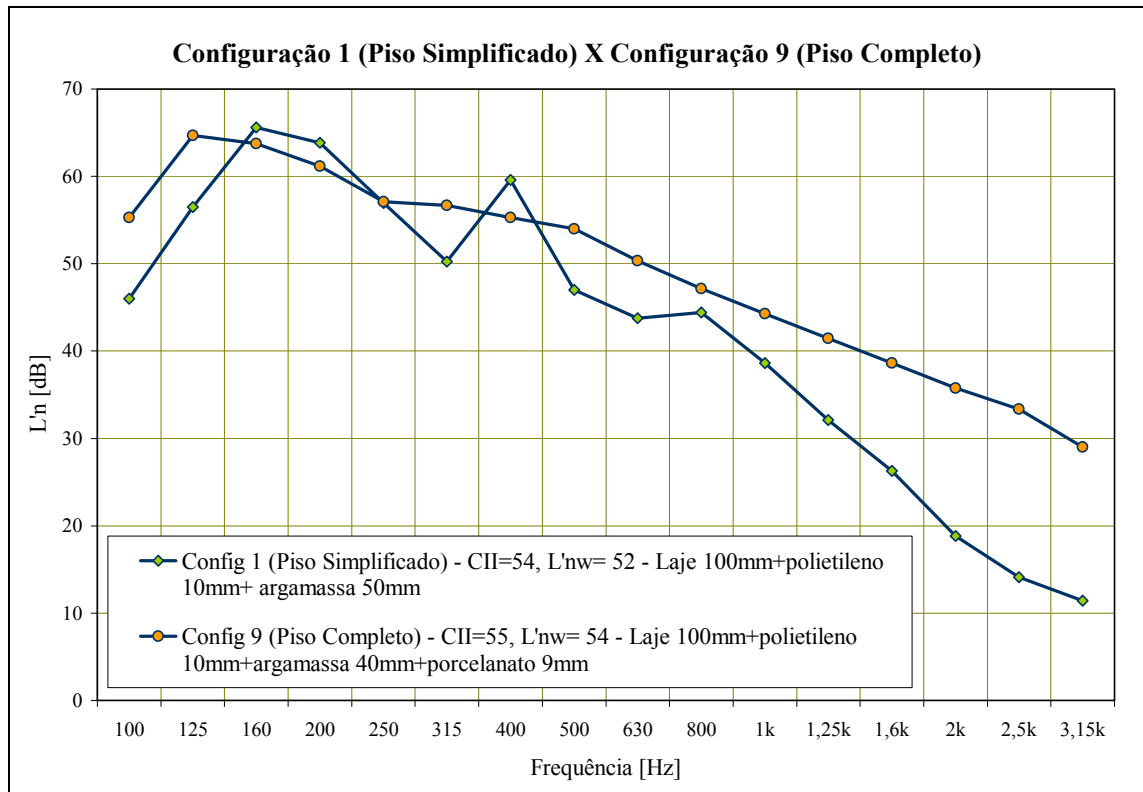


FIGURA 79 – Comparação entre Configuração 1 (Piso Simplificado) e Configuração 9 (Piso Completo).

Comparando-se a Configuração 1 - sistema de piso simplificado constituído por laje 100mm + 1 manta de polietileno 10mm + contrapiso 50mm, CII=54 e L'_{nw} =52 - com a Configuração 9 - sistema de piso completo, constituído por laje 100mm + 1 manta de polietileno 10mm + contrapiso 40mm + porcelanato 9mm, CII=55 e L'_{nw} =54, observa-se que os valores de CII e L'_{nw} permaneceram praticamente os mesmos (FIG 79), entretanto, os valores espectrais apresentaram diferença significativa, principalmente nas frequências mais elevadas. O menor isolamento proporcionado pelo piso completo é justificável, uma vez que seu sistema resiliente é mais rígido que o sistema resiliente do piso simplificado, devido às restrições de deformação lateral que existem no piso completo, as quais não ocorrem no caso simplificado. Além disso, observa-se que a presença de ressonância, em torno de 400Hz no piso simplificado, foi aparentemente predominante na determinação do valor de CII, elevando o valor do mesmo para um CII próximo do obtido para o piso completo.

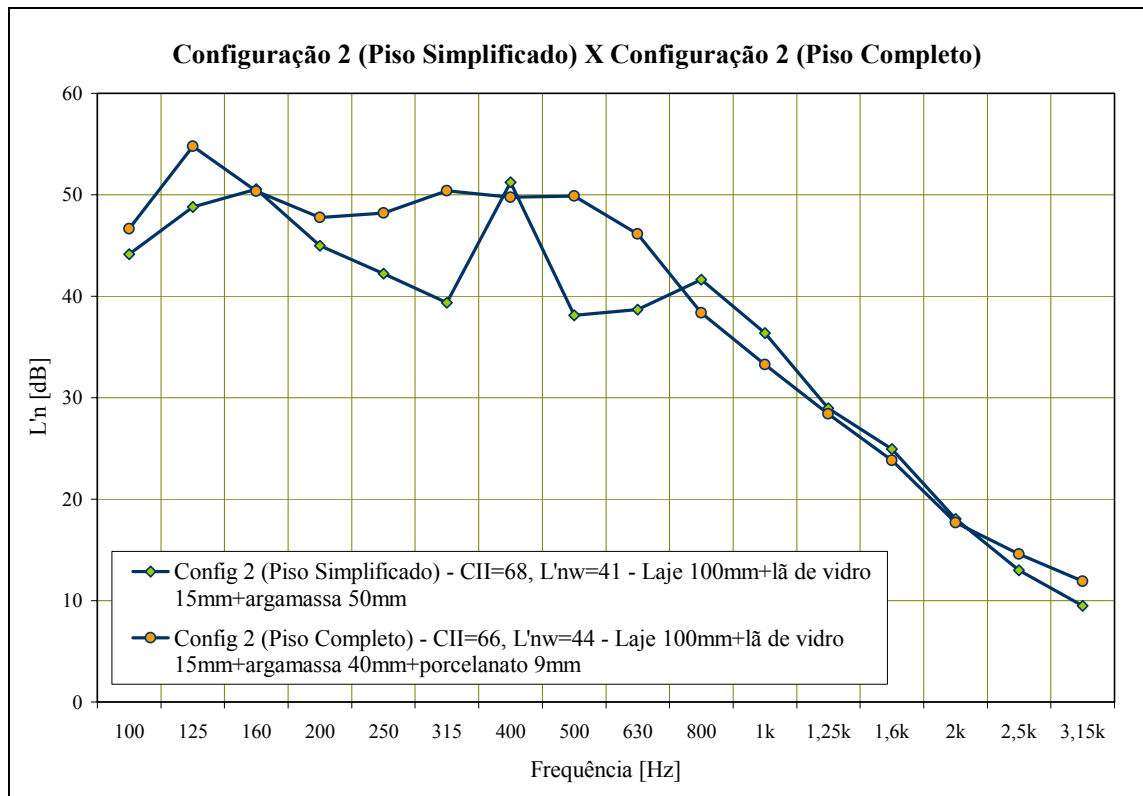


FIGURA 80 – Comparação entre Configuração 2 (Piso Simplificado) e Configuração 2 (Piso Completo).

Comparando-se a Configuração 2 - sistema de piso simplificado constituído por laje 100mm + 1 lâ de vidro 15mm + contrapiso 50mm, CII=68 e $L'_{nw}=41$ - com a Configuração 2 - sistema de piso completo, constituído por laje 100mm + 1 lâ de vidro 15mm + contrapiso 40mm + porcelanato 9mm, CII=66 e $L'_{nw}=44$, observa-se que os valores de CII e L'_{nw} permaneceram praticamente os mesmos (FIG 80), entretanto, os valores espectrais apresentaram diferença nas frequências medias e baixas. O menor isolamento proporcionado pelo piso completo ocorre devido às restrições de deformação lateral que existem no piso completo, as quais não ocorrem no caso simplificado. Por outro lado, a ressonância em torno de 400Hz foi determinante para o CII do caso simplificado, fazendo com que este permanecesse próximo do CII do piso completo.

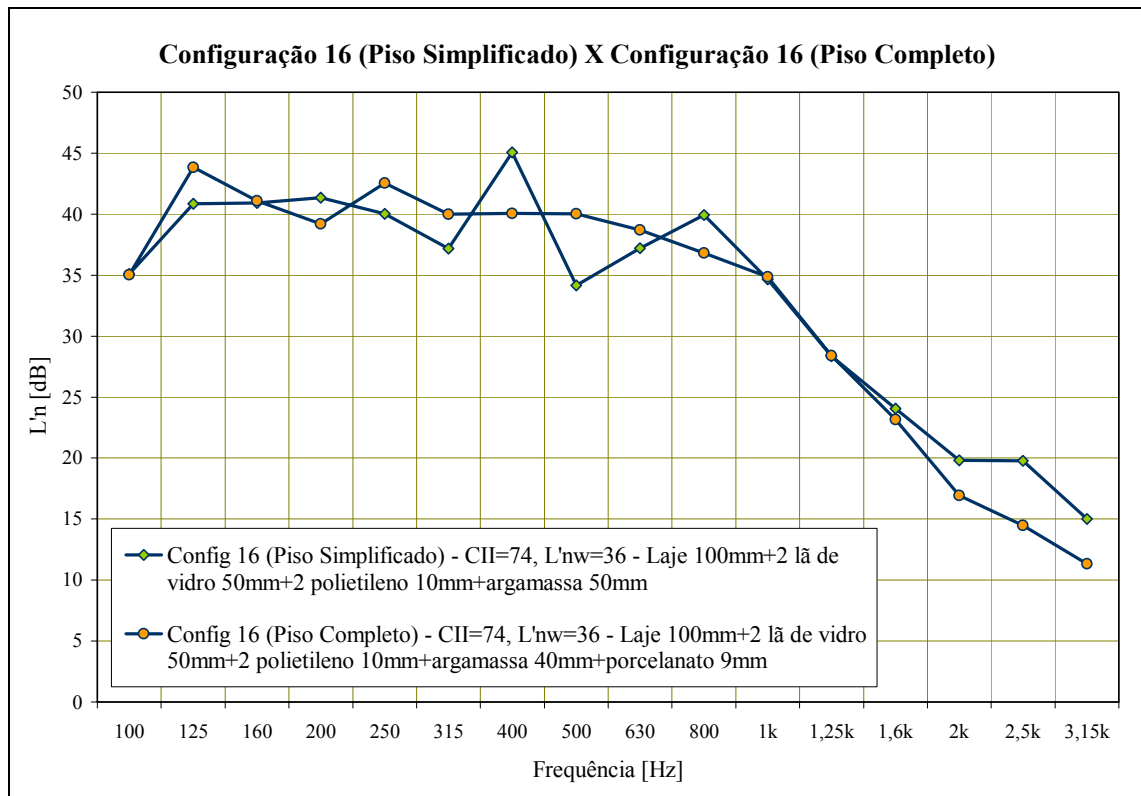


FIGURA 81 – Comparação entre Configuração 16 (Piso Simplificado) e Configuração 16 (Piso Completo).

Comparando-se a Configuração 16 – sistema de piso simplificado constituído por laje 100mm + 2 lâ de vidro 50mm + 2 polietileno de 10mm + contrapiso 50mm, CII=74 e $L'_{nw}=36$ – com Configuração 16 – com sistema de piso completo, constituído por laje 100mm + 2 lâ de vidro 50mm + 2 polietileno de 10mm + contrapiso 40mm + porcelanato 9mm, CII=74 e $L'_{nw}=36$, observa-se que os valores de CII e L'_{nw} permaneceram os mesmos (FIG 81). Esse resultado indica que em relação aos valores globais e espectrais, o desempenho em ambas as metodologias apresentaram valores similares.

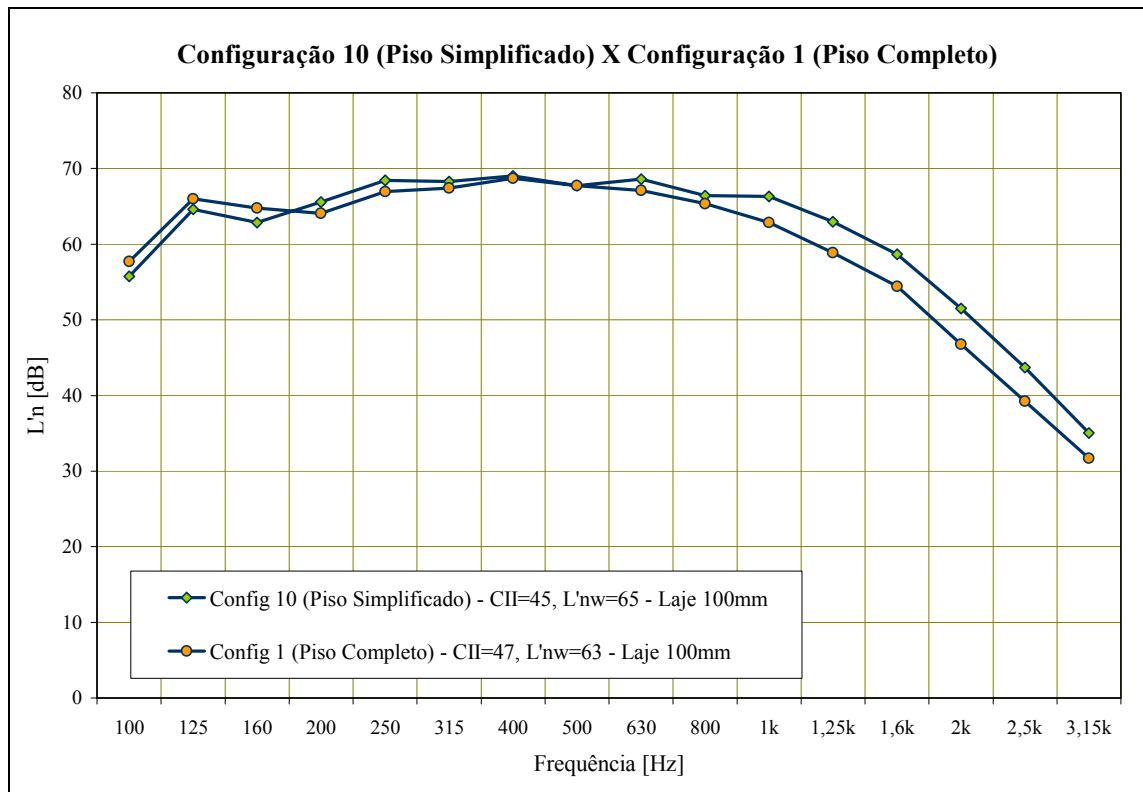


FIGURA 82 – Comparação entre Configuração 10 (Piso Simplificado) e Configuração 1 (Piso Completo).

Comparando-se a Configuração 10 – sistema de piso simplificado constituído por laje 100mm, CII=45 e $L'_{nw}=65$ – com a Configuração 1 – sistema de piso completo, constituído por laje 100mm, CII=47 e $L'_{nw}=63$, observa-se que os valores de CII e L'_{nw} permaneceram bem próximos (FIG 82). A pouca diferença entre os resultados se deve à posição da castanhola: no ensaio simplificado permaneceu no centro da laje, enquanto que no ensaio normalizado a máquina foi posicionada em quatro locais distribuídos no espaço, atendendo recomendações da ISO 140-7. Além disso, no ensaio simplificado foi utilizado um menor número de posições de microfone no ambiente receptor do que no ensaio do piso flutuante completo, sendo também, utilizadas diferentes posições de microfone entre os dois ensaios.

5.5. $\Delta L'n$ Pisos flutuantes simplificados e $\Delta L'n$ Pisos flutuantes completamente instalados (ISO)

A seguir apresentam-se os resultados de caracterização do isolamento proporcionado por cada sistema de piso flutuante completo, em relação à laje no osso, sem a utilização de piso flutuante.

Esses valores são estabelecidos pela Redução do Nível de Ruído de Impacto Normalizado $\Delta L'n$, calculados conforme BISTAFA (2006).

$$\Delta L'n = L'n_{\text{piso flutuante}} - L'n_{\text{laje}} \quad (2.31)$$

onde $\Delta L'n$ é a Redução do Nível de Ruído de Impacto Normalizado;

$L'n_{\text{piso flutuante}}$ é o Nível de Ruído de Impacto Normalizado, por 1/3 de oitava, de cada configuração de piso flutuante; e

$L'n_{\text{laje}}$ é o Nível de Ruído de Impacto Normalizado, por 1/3 de oitava, da laje sem acabamento.

Esses valores estão discriminados na TAB 12. Vale ressaltar que nessa Tabela, além dos valores de $\Delta L'n$, também foram calculados os valores globais $\Delta L'nw$, seguindo o mesmo procedimento recomendado para o cálculo de $\Delta L'n$ spectral.

TABELA 12 - $\Delta L'n$ e $\Delta L'nw$ dos pisos flutuantes completos

Configurações	$\Delta L'n$ [dB] - f [Hz]																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	$\Delta L'nw$
2	11	11	14	16	19	17	19	18	21	27	30	30	31	29	25	20	19
3	7	7	14	16	23	25	28	29	33	35	35	33	31	27	22	17	21
4	6	7	14	14	16	19	22	23	25	27	27	26	25	24	18	13	18
5	10	10	15	14	16	17	20	20	21	22	23	23	22	21	18	15	18
6	5	4	4	1	5	5	4	2	3	3	4	3	4	4	3	-2	3
7	5	4	9	9	8	7	7	7	8	9	10	13	13	12	9	6	8
8	1	-1	1	4	11	13	16	15	15	16	15	14	12	7	2	-2	10
9	2	1	1	3	10	11	13	14	17	18	19	17	16	11	6	3	9
10	3	1	1	3	13	14	18	19	23	24	24	24	20	16	10	6	11
11	6	9	10	15	22	26	28	30	32	35	37	36	33	29	25	20	20
12	8	7	7	8	9	11	10	11	13	16	20	24	23	23	20	16	10
13	19	20	21	21	26	30	33	34	38	41	41	39	36	30	23	18	28
14	1	7	8	9	14	15	16	16	18	19	20	21	24	23	22	17	13
15	3	5	-1	0	3	3	3	4	5	7	8	10	12	12	8	6	4
16	23	22	24	25	24	27	29	28	28	29	28	30	31	30	25	20	27

Além disso, também foram calculados os valores de ΔL e ΔL_w , segundo a norma ISO 717-2 (TAB 13). A diferença entre $\Delta L'_n$ e ΔL é que o primeiro refere-se aos valores da laje sem acabamento e o segundo, refere-se à valores de referência da norma ISO 717-2.

TABELA 13 - ΔL e ΔL_w dos pisos flutuantes completos segundo ISO 717-2

Configurações	ΔL [dB] - f [Hz]																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	ΔL_w
1	9	2	3	4	2	2	1	3	4	6	9	13	18	25	33	40	15
2	20	13	18	21	21	19	20	21	25	33	39	44	48	54	57	60	34
3	16	8	18	20	25	27	30	31	37	41	45	46	48	52	54	57	36
4	16	8	18	18	18	21	23	26	29	33	36	39	43	49	51	54	33
5	19	11	19	19	18	19	21	23	25	29	32	36	40	46	51	56	33
6	14	6	7	5	8	7	5	5	7	9	13	16	21	29	36	39	18
7	15	6	12	14	10	9	9	10	12	15	19	26	30	37	42	46	23
8	10	0	5	8	13	15	17	17	19	22	24	27	29	32	34	38	25
9	12	3	4	7	12	13	15	17	21	24	28	31	33	36	39	43	24
10	12	2	4	8	15	16	19	22	27	31	33	37	38	41	43	46	26
11	16	11	14	20	24	28	30	33	36	42	46	49	50	54	57	60	35
12	17	8	11	13	11	13	12	14	17	23	29	37	40	48	53	56	25
13	28	22	24	25	28	32	34	37	41	47	50	52	54	55	56	58	43
14	11	9	11	13	16	17	17	19	22	25	29	34	41	48	54	57	28
15	12	6	2	4	5	5	5	7	9	13	17	23	30	37	40	46	19
16	32	24	27	29	26	30	30	30	32	35	37	44	49	55	58	61	42

Além destes, foram calculados também os resultados de caracterização do isolamento proporcionado por sistema de piso flutuante simplificado, em relação à laje sem acabamento, sem a utilização de piso flutuante.

Os valores de $\Delta L'_n$ e $\Delta L'_{nw}$ dos pisos flutuantes simplificados, também foram calculados em conformidade com BISTAFA (2006). Esses valores estão discriminados na TAB 14. Vale ressaltar que, também foram calculados os valores de ΔL e ΔL_w , segundo a norma ISO 717-2, para os pisos simplificados (TAB 15).

TABELA 14 - $\Delta L'n$ e $\Delta L'nw$ dos pisos flutuantes simplificados

Configurações	$\Delta L'n$ [dB] - f [Hz]																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	$\Delta L'nw$
1	10	8	-3	2	11	18	9	21	25	22	28	31	32	33	30	24	13
2	12	16	12	21	26	29	18	30	30	25	30	34	34	33	31	26	24
3	14	18	13	20	25	29	19	30	30	25	30	34	34	33	31	25	25
4	14	20	15	21	25	29	18	29	30	25	30	34	35	34	30	25	25
5	17	21	18	23	27	30	19	28	30	25	30	35	35	34	31	25	25
6	16	19	15	20	26	29	17	29	30	25	30	34	35	33	30	24	25
7	16	20	15	21	25	30	17	29	30	24	29	34	35	34	31	25	25
8	19	22	20	24	27	27	19	31	31	26	30	35	36	34	31	25	27
9	24	19	15	23	27	30	23	34	29	25	30	34	34	33	30	23	26
11	16	19	16	22	26	30	19	31	31	26	30	34	34	33	29	21	26
12	18	22	18	24	28	31	20	30	29	26	29	34	34	31	23	16	27
13	15	20	16	22	26	30	17	31	30	25	30	34	35	33	26	19	26
14	18	21	17	22	27	29	19	32	29	25	30	34	35	33	28	21	26
15	22	20	18	24	29	32	23	34	31	27	31	35	36	33	26	21	28
16	21	24	22	24	28	31	24	34	31	27	32	35	35	32	24	20	29
17	19	21	17	23	29	30	21	31	29	24	31	34	33	30	25	19	26
18	25	22	18	21	26	30	24	34	30	26	31	35	36	34	31	25	27
19	18	19	16	21	27	31	21	33	30	26	28	34	35	33	29	24	26
20	14	12	7	13	21	25	15	28	25	22	29	32	32	32	28	21	20
21	20	18	16	22	29	30	20	32	29	24	29	34	35	33	29	22	25
22	21	18	15	24	28	28	21	32	30	26	29	34	34	33	28	21	27
23	20	20	17	23	27	29	20	32	30	25	28	34	34	33	29	22	27
24	19	18	15	23	28	29	21	32	30	25	29	34	34	33	29	23	26
25	21	19	15	22	27	30	21	32	28	24	29	33	34	33	28	21	26
26	21	21	16	22	24	26	23	33	30	27	30	33	34	33	28	19	26
27	22	21	16	23	24	25	21	33	30	27	29	33	34	33	28	22	26
28	22	20	14	23	25	25	21	33	30	27	30	33	34	33	29	23	26
29	21	22	18	23	25	26	20	32	32	27	31	34	35	34	30	24	27
30	22	18	15	22	28	31	22	33	30	26	30	34	35	34	30	23	26
31	22	16	13	22	29	31	23	33	30	26	29	34	35	33	30	23	25
32	22	20	15	21	31	33	23	34	30	26	31	35	35	34	31	25	27

TABELA 15 - ΔL e ΔL_w dos pisos flutuantes simplificados segundo ISO 717-2

Configurações	ΔL [dB] - f [Hz]																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	ΔL_w
1	21	11	2	5	12	19	10	23	27	27	33	40	46	53	58	61	26
2	23	19	17	24	27	30	19	32	32	30	36	43	47	54	59	63	37
3	26	21	19	23	26	30	20	33	32	30	35	43	47	54	59	62	38
4	25	23	20	24	25	30	19	32	32	30	36	43	48	54	59	62	38
5	28	24	23	26	28	31	20	31	32	30	36	44	49	55	59	62	38
6	27	22	20	23	26	30	18	31	32	30	35	43	48	54	59	61	38
7	27	23	20	24	26	31	18	32	32	29	35	44	48	54	59	62	38
8	30	25	25	27	28	29	20	34	33	31	36	44	49	55	59	62	40
9	35	22	20	26	28	32	24	36	31	30	36	43	48	54	58	60	39
10	8	3	2	2	-1	2	6	7	11	7	12	16	23	28	44	53	16
11	27	22	21	25	27	31	20	34	34	31	35	43	47	53	57	58	39
12	29	24	23	27	28	32	21	33	32	31	35	43	47	51	51	53	40
13	27	23	21	25	27	31	18	34	32	30	36	43	48	53	54	56	39
14	29	24	22	25	27	30	20	35	31	30	35	43	48	54	56	58	39
15	34	23	23	27	29	33	24	37	33	32	37	44	49	54	54	58	41
16	32	27	27	27	29	32	25	36	34	32	37	44	48	52	52	57	42
17	30	24	22	26	29	31	22	34	32	29	37	43	47	50	53	56	39
18	36	25	23	24	26	31	25	36	33	31	37	44	49	55	59	62	40
19	30	21	21	24	28	32	22	35	32	31	34	43	48	54	57	61	39
20	25	15	12	16	22	27	16	31	28	27	34	41	45	53	56	58	33
21	31	21	21	25	29	31	21	35	31	30	35	43	48	54	57	59	38
22	32	21	20	27	29	30	22	35	33	31	34	43	47	53	56	58	40
23	32	23	23	26	28	31	21	34	32	30	34	43	48	54	57	59	40
24	30	21	20	26	28	30	22	35	32	30	34	43	47	54	58	60	39
25	32	22	20	25	28	31	22	35	30	29	35	42	48	53	57	58	39
26	32	23	21	25	25	27	24	36	33	32	36	42	47	53	56	56	39
27	33	23	21	26	25	26	22	35	32	32	35	42	47	53	57	59	39
28	33	23	19	26	26	27	22	35	32	32	36	42	47	53	57	60	39
29	32	25	23	26	26	27	21	35	34	32	36	43	48	54	58	61	40
30	33	21	20	25	29	33	23	36	33	31	36	43	48	54	58	60	39
31	33	19	19	25	29	33	24	36	33	31	35	43	48	54	58	60	38
32	33	23	20	24	31	34	24	37	33	32	36	44	48	55	59	62	40

Considerando os dados apresentados na Tabelas 12 e 14, as figuras 84, 85 e 86 apresentam uma comparação entre os valores de $\Delta L'n$ e $\Delta L'nw$, entre as configurações com pisos flutuantes simplificados e as configurações com pisos flutuantes completos.

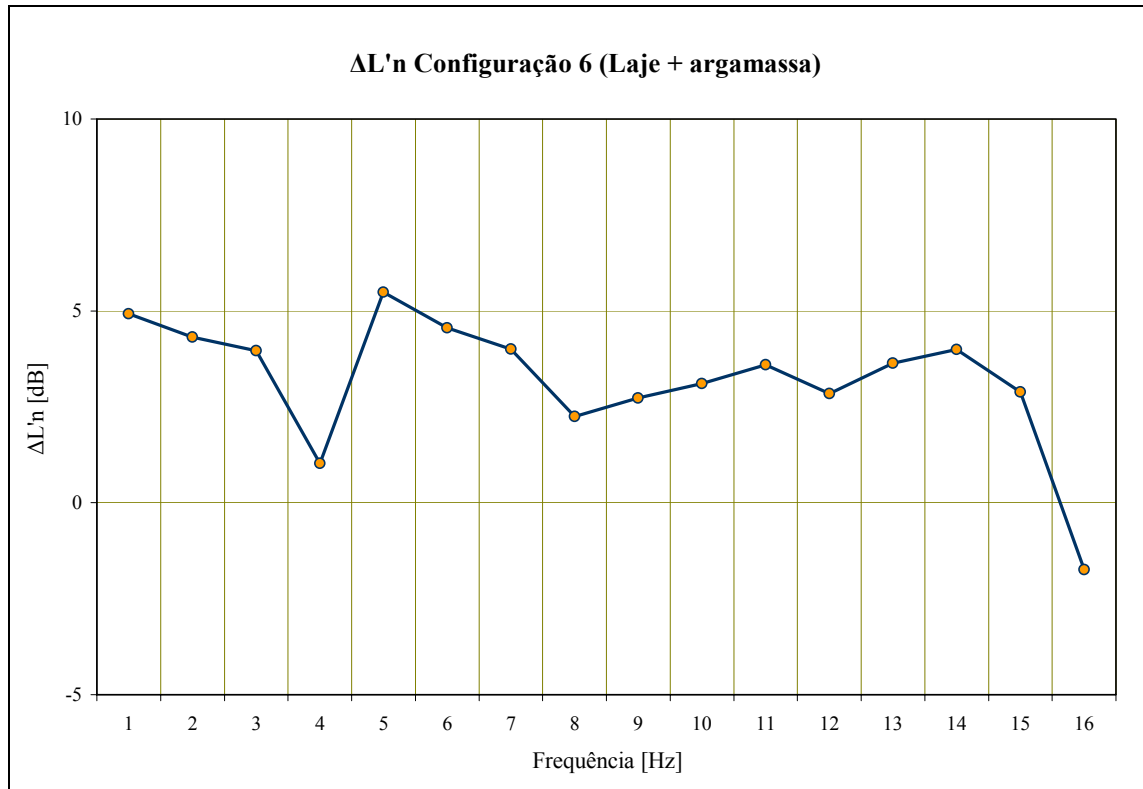


FIGURA 83 – $\Delta L'n$ da Configuração 6 (Piso Completo: laje + argamassa).

A FIG 83 apresenta o gráfico dos valores espectrais de $\Delta L'n$ da Configuração 6 (laje+argamassa+porcelanato, sem material resiliente) do piso flutuante completo. O valor de $\Delta L'nw$ para esta configuração foi de 3dB(A). Isto representa que, ao adicionar um contrapiso de 4cm na laje estrutural de 10cm de espessura, o isolamento de ruído de impacto aumenta em 3dB(A).

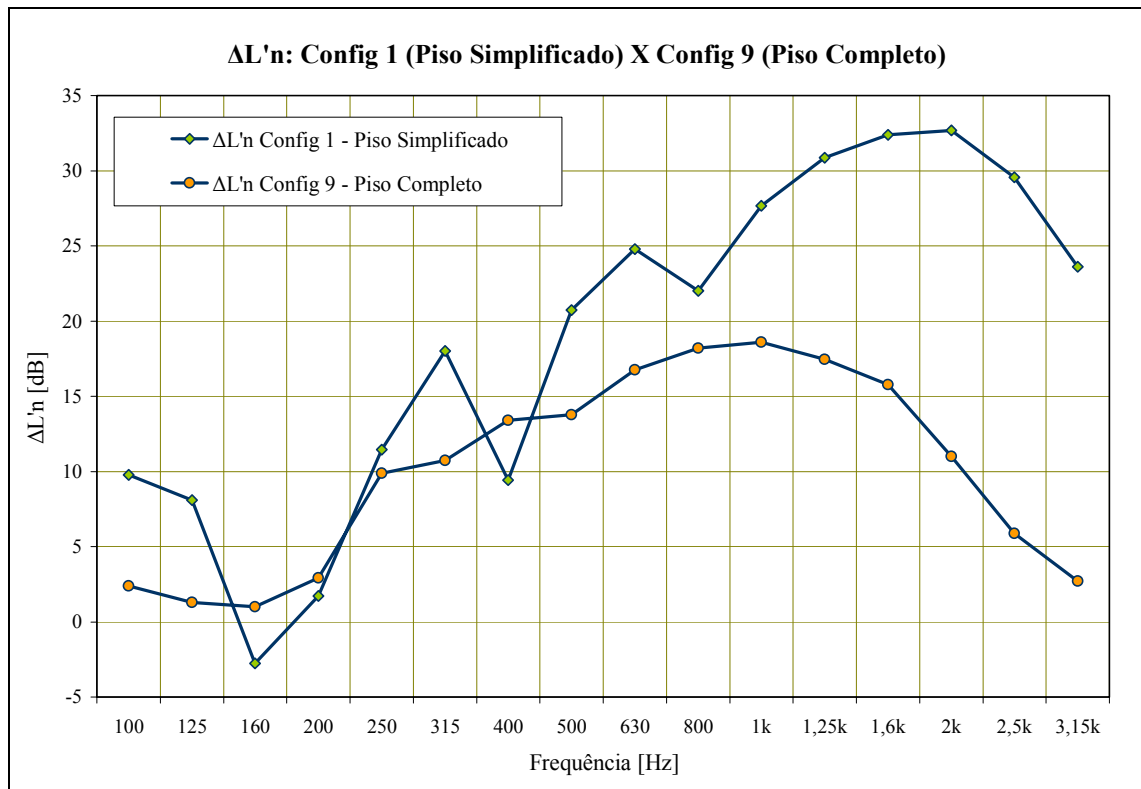


FIGURA 84 – Comparação de $\Delta L'n$ entre Configuração 1 (Piso Simplificado) e Configuração 9 (Piso Completo).

A FIG 84 apresenta um gráfico comparativo dos valores espectrais de $\Delta L'n$ entre a Configuração 1 – piso flutuante simplificado – e a Configuração 9 – piso flutuante completo. Os valores de $\Delta L'_{nw}$ para estas configurações foram de 13dB(A) e 9dB(A), respectivamente. Observa-se que os valores espectrais e globais variaram significativamente. Em geral, nas frequências médias e altas, o sistema completo proporcionou menor isolamento que o sistema simplificado, isto pode ser explicado pelo fato de o sistema completo ser mais rígido, devido ao impedimento das deformações no plano da manta de polietileno. As grandes variações ocorridas no modelo simplificado são resultantes da presença de ressonância nas frequências próximas a 160Hz e 400Hz, onde a isolamento acústica não é significativa. No caso específico de 160Hz o valor de $\Delta L'n$ chega mesmo a ficar negativo, indicando que a isolamento nesta frequência está inferior a isolamento da laje sem a presença da manta de polietileno.

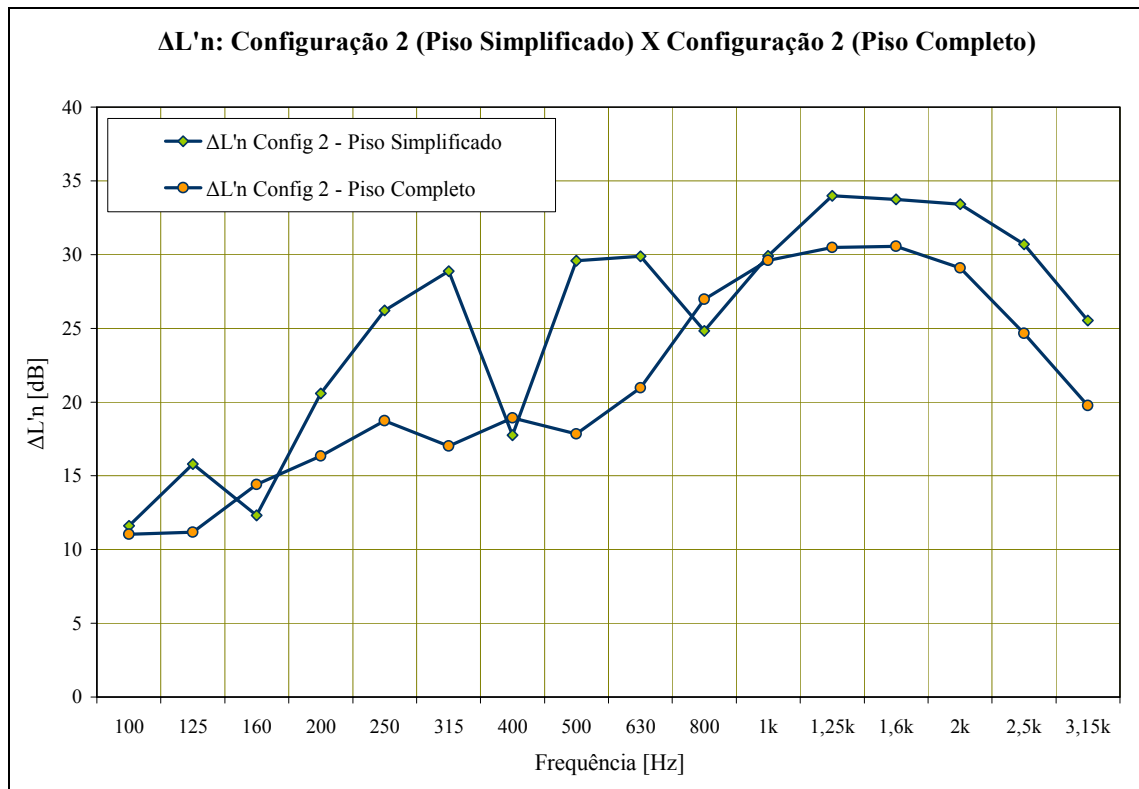


FIGURA 85 – Comparação de $\Delta L'n$ entre Configuração 2 (Piso Simplificado) e Configuração 2 (Piso Completo).

A FIG 85 apresenta o gráfico comparativo dos valores espectrais de $\Delta L'n$ entre a Configuração 2 – piso flutuante simplificado – e a Configuração 2 – piso flutuante completo. Os valores de $\Delta L'_{nw}$ para estas configurações foram de 24dB(A) e 19dB(A), respectivamente. Nesse caso, os valores globais e espectrais também variaram, mantendo uma mesma tendência nas frequências acima de 1000Hz. Em geral, o sistema completo proporcionou menor isolamento que o sistema simplificado, isto pode ser explicado pelo fato de o sistema completo ser mais rígido, devido ao impedimento de deformações no plano da manta de lã de vidro. As grandes variações ocorridas no modelo simplificado são resultantes da presença de ressonância nas frequências próximas a 160Hz, 400Hz e 800Hz.

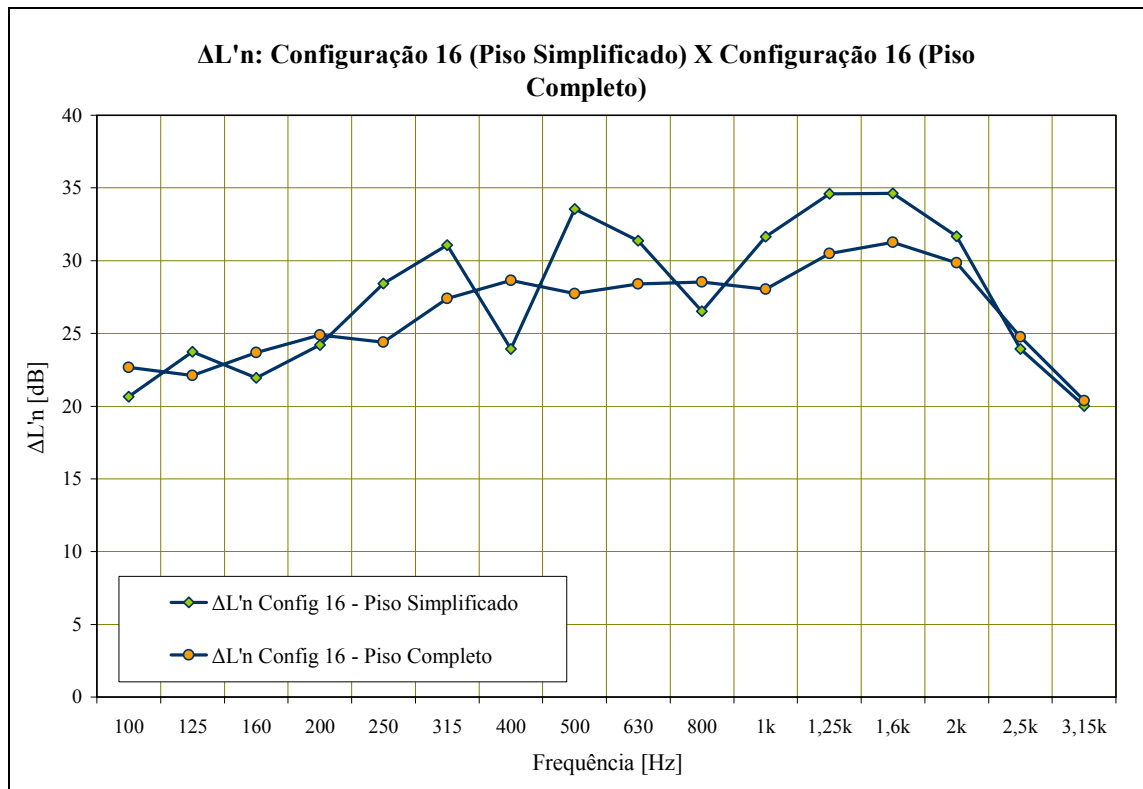


FIGURA 86 – Comparação de $\Delta L'n$ entre Configurações 16 (Piso Simplificado) e Configuração 16 (Piso Completo).

A FIG 86 apresenta um gráfico comparativo dos valores espectrais de $\Delta L'n$ entre a Configuração 16 – piso flutuante simplificado – e a Configuração 16 – piso flutuante completo. Os valores globais de $\Delta L'_{nw}$ para estas configurações foram de 29dB(A) e 27dB(A), respectivamente. Os valores globais e espectrais variaram, mantendo uma mesma tendência da curva. Em geral, o sistema completo proporcionou menor isolamento que o sistema simplificado, isto pode ser explicado pelo fato de o sistema completo ser mais rígido, devido ao impedimento de deformações no plano da manta de lã de vidro. As grandes variações ocorridas no modelo simplificado são resultantes da presença de ressonância nas frequências próximas a 160Hz, 400Hz e 800Hz.

5.6. Comparação entre critérios FHA (1967) e NBR 15575-3:2008.

Como mencionado no capítulo 3 deste trabalho, os valores recomendados pela FHA estão apresentados na TAB 14 e os recomendados pela norma brasileira NBR 15575-3:2008, estão discriminados na TAB 15.

TABELA 16 - Valores de referência de CII segundo FHA

Relação entre os ambientes			Grau I	Grau II	Grau III
Apartamento A	acima de	Apartamento B	CII	CII	CII
quarto	acima de	quarto	≥ 55 dB	52 a 54dB	48 a 51dB

Fonte: BERENDT, 1967

TABELA 17 - Valores de referência de $L'_{nT,w}$ segundo norma ABNT NBR15575-3:2008

Elemento	$L'_{nT,w}$ [dB]	Nível de desempenho
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, sem tratamento acústico	$< 80^*$	M (Mínimo)
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, com tratamento acústico	55 a 65 < 55	I (Intermediário) S (Superior)

* valor mínimo exigido corresponde a valores representativos de ensaios realizados em pisos de concreto maciço, com espessura de 10 cm a 12 cm, sem acabamento.

Para comparar os resultados dos ensaios com os critérios estabelecidos pela FHA e os estabelecidos pela norma brasileira NBR 15575-3:2008, define-se os parâmetros θ_{CII} e $\theta_{L'_{nT,w}}$, conforme expressões a seguir.

$$\theta_{CII} = CII_{\text{medido}} - CII_{\text{referência}} \quad (5.1)$$

$$\theta_{L'_{nT,w}} = L'_{nT,w \text{ referência}} - L'_{nT,w \text{ medido}} \quad (5.1)$$

onde: $CII_{\text{referência}} = 48$, limitante inferior estabelecido pelo FHA;

$L'_{nT,w \text{ referência}} = 80$, limitante inferior estabelecido pela NBR 15575-3:2008.

Os índices θ_{CII} e $\theta_{L'_{nT,w}}$ são valores de folga que representam o quanto o CII ou o $L'_{nT,w}$, respectivamente, medido está acima (ou abaixo, quando assumir valor negativo) dos critérios mínimos estabelecidos pela FHA, para situação de quarto sobre quarto, e pela NBR 15575-3:2008, para situação de laje, ou outro elemento portante, com ou sem

contrapiso. Portanto, os valores de θ_{CII} e $\theta L'_{nT,w}$ indicam o nível de restrição dos critérios estabelecidos pela FHA e pela NBR 15575-3:2008.

Na TAB 16 apresenta-se uma análise comparativa entre os limites estabelecidos pela FHA e pela norma brasileira NBR 15575-3:2008.

TABELA 18 – Análise comparativa entre FHA e NBR15575-3

Configuração de Piso Flutuante Completo, segundo ISO 140-7.	Critério FHA (CII)	Critério ABNT NBR 15575-3:2008 ($L'_{nT,w}$)
	θ_{CII}	$\theta L'_{nT,w}$
Configuração 1	-1	17
Configuração 2	18	36
Configuração 3	13	38
Configuração 4	13	35
Configuração 5	16	35
Configuração 6	2	20
Configuração 7	7	25
Configuração 8	5	27
Configuração 9	7	26
Configuração 10	7	28
Configuração 11	15	37
Configuração 12	9	27
Configuração 13	26	44
Configuração 14	12	30
Configuração 15	3	21
Configuração 16	26	44

Como pode ser verificado na TAB 14, os critérios estabelecidos pela FHA são bem mais restritivos que os da NBR 15575-3:2008 (TAB 15). Isso pode ser verificado considerando que os valores obtidos de $\theta L'_{nw}$ (folga em relação à NBR 15575-3:2008) estão bem superiores aos valores de θCII (folga em relação à FHA).

A NBR 15575-3:2008 estabelece que $L'_{nw} < 80$ e afirma que este “valor mínimo exigido corresponde a valores representativos de ensaios realizados em pisos de concreto maciço, com espessura de 10 cm a 12 cm, sem acabamento”. Segundo a FHA, o valor de CII deve ser superior a 48, já que este é o valor típico encontrado em uma laje maciça de concreto de 10cm de espessura.

Observando os experimentos dos ensaios realizados da Configuração 1, laje maciça de concreto com 10cm de espessura, verificou-se que os valores encontrados foram $CII= 47$ e $L'_{nw}= 63$. Em Relatório Técnico elaborado por (VECCI, 2004), no ensaio de ruído de impacto de pisos realizado em uma laje de concreto pré-moldado com 8cm de espessura, $F_{ck} = 20\text{MPa}$, pré-laje de 3cm e capeamento de 5cm, com área de piso de $7,55\text{m}^2$ (2,45m x 3,08m), foram obtidos valores de $CII= 45$ e $L'_{nw}= 65$.

Cabe ressaltar que estes valores estão próximos do limite inferior de isolamento de ruído de impacto recomendado pela FHA ($CII=48$, para situação de quarto sobre quarto). Por outro lado, é interessante observar que o limite mínimo de isolamento de ruído de impacto recomendado pela NBR 15575-3:2008 é de $L'_{nw}=80$, o que equivale a $CII=30$.

Considerando que lajes maciças de concreto com 10cm de espessura são bastantes utilizadas na construção civil brasileira, os resultados acima confirmam que este sistema construtivo atende as condições mínima e intermediária de isolamento de ruído de impacto recomendadas pela NBR 15575-3:2008. É importante destacar que no caso das habitações populares ensaiadas (VECCI, 2004), o valor de CII está 15dB acima do limite mínimo previsto na NBR 15575-3:2008, indicando que esta norma não apresenta restrição aos sistemas construtivos brasileiros, pelo contrário, admite utilização de sistemas construtivos com níveis de isolamento de impacto bem inferiores aos que são atualmente praticados no país.

6.

CONCLUSÕES

6.1. Considerações Finais

O incômodo provocado por ruído de impacto em edificações de andares múltiplos, devido à queda de objetos no piso e pessoas caminhando nele pode ser atenuado com sistemas de pisos flutuantes, os quais devem ser estabelecidos antes da execução da obra civil, durante a fase de projeto e detalhamento.

Neste trabalho foram realizados experimentos em diversas configurações de sistemas de pisos flutuantes de acordo com as recomendações da ISO 140-7. Nos ensaios foram utilizados diferentes materiais no contrapiso, no acabamento do piso, bem como diferentes materiais resilientes para isolar o ruído de impacto de piso. A partir dos resultados destes ensaios, foi possível confeccionar quadros comparativos, identificando o desempenho de isolamento de ruído de impacto de cada sistema ensaiado e ressaltando as configurações com grande potencial de uso nas construções de edificações civis nacionais.

Observou-se que, com exceção da Configuração 8, constituída de manta de polietileno, argamassa e porcelanato, todos os pisos flutuantes com os materiais resilientes ensaiados neste trabalho apresentaram desempenho compatível com a melhor graduação

estabelecida pela FHA. Ressalta-se ainda que, em geral, a lâ de vidro apresentou desempenho superior em relação à manta de polietileno.

Além dos ensaios efetuados em conformidade com a ISO 140-7, também foram efetuados, ensaios adicionais simplificados em pisos flutuantes reduzidos, cujo procedimento está descrito no corpo do trabalho.

Comparando os resultados dos ensaios utilizando método simplificado aplicado em pisos flutuantes reduzidos, e o método da ISO 140-7, aplicado em pisos flutuantes completos, constatou-se que os valores globais de CII e L'_{nw} , em geral, permaneceram similares. Por outro lado, comparando os valores espectrais obtidos em cada procedimento, verificou-se que os valores de L'_n apresentaram variações significativas para a maioria das frequências de terço de oitava ensaiadas.

Nos ensaios simplificados, verificou-se que o acréscimo na espessura da manta de polietileno, acima de 10mm, em geral, não alterou os resultados, enquanto que o acréscimo na espessura da lâ de vidro alterou o desempenho do piso flutuante até a espessura de 30mm. Acima de 30mm na espessura da lâ de vidro, não foi verificado nenhum ganho representativo no desempenho de isolamento do sistema.

Além disso, observou-se que, em pisos flutuantes com mantas de polietileno e lâ de vidro trabalhando simultaneamente como material resiliente, a ordem dos materiais não alterou o resultado. Também se verificou que os desempenhos dos sistemas de pisos flutuantes apresentaram melhores resultados quando os materiais com mesma propriedade estavam dispostos lado a lado do que quando separados.

Os resultados obtidos foram utilizados também para avaliar os critérios estabelecidos pela FHA e pela NBR 15575-3:2008. Observou-se que o limite do critério estabelecido pela NBR 15575-3:2008, $L'_{nw} < 80$, não apresenta restrição às tipologias de sistemas construtivos praticados na grande maioria das edificações brasileiras de andares múltiplos. Em geral, nestas edificações são utilizadas lajes de concreto com espessura superior a 8cm e que um valor típico de L'_{nw} para este tipo de laje é de $L'_{nw}=65$, e não de $L'_{nw}=80$, conforme referenciado nesta norma. Conforme verificado no ensaio da Configuração 1 deste trabalho, com laje maciça de concreto de 10cm, os valores encontrados foram CII=47 e $L'_{nw}=63$, reforçando, assim, a inconsistência do critério e da referência dos ruídos de impacto de pisos previstos na NBR 15575-3:2008. Por outro

lado, os resultados deste trabalho foram bastante coerentes com os critérios recomendados pela FHA, uma vez que o critério mínimo estabelecido pelo mesmo está bastante próximo do resultado do ensaio obtido para laje sem piso flutuante. Além disso, como esperado, os desempenhos de isolamento de impacto de piso proporcionado pelos sistemas com pisos flutuantes apresentaram resultados iguais ou superiores aos critérios mais restritivos estabelecidos pela FHA.

6.2. Proposta para futuros trabalhos

Propõe-se o desenvolvimento de trabalhos adicionais para dar seqüência às pesquisas realizadas e apresentadas nesta Dissertação de Mestrado. Dentre as sugestões destacam-se:

- comparação entre expressões analíticas existentes na literatura para predição de isolamento de ruído de impacto e os resultados dos ensaios experimentais obtidos neste trabalho;
- realização de ensaios adicionais de ruído de impacto de pisos para confirmar as observações apresentadas nesta dissertação, principalmente aquelas referentes aos ensaios de pisos flutuantes simplificados e, caso necessário, estabelecer outros procedimentos para estes ensaios simplificados;
- realização de ensaios em diferentes tipologias de lajes estruturais (lajes nervuradas, maciças com diferentes espessuras, lajes com forma de concreto celular autoclavado, lajes com formas de isopor, dentre outras);
- predição de ruído de impacto de pisos utilizando simulação computacional via Análise Estatística de Energia e comparação com resultados experimentais e analíticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15575-3: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos*. Brasil, 2008. 37p.
2. AKKERMAN, S. Pisos flutuantes para redução do nível de ruídos. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES – I SIBRAMA – XVII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 6., 1996, Petrópolis. *Anais*. Rio de Janeiro: SOBRAC, 1996. 280 p.
3. ASTM INTERNATIONAL. Annual Book of ASTM Standards E989. *ASTM E 989: Standard Classification for Determination Impact Insulation Class (IIC)*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1989.
4. BELO HORIZONTE, Prefeitura (Secretaria Municipal do Meio Ambiente e Saneamento). “Lei Municipal Nº 9505 de 23 de janeiro de 2008”.
5. BERENDT, R.D.; WINZER, G.E.; BURROUGHS, C.B.. *Airborne, Impact and Structural Borne Noise Control in Multifamily Dwellings*. Washington, D.C.: U.S. Department of Housing and Urban Development (HUD), 1967.
6. BISTAFA, S.R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. São Paulo: Edgar Blücher, 2006. 368p.
7. BLAZIER, W.; DUPREE, R. Investigation of low-frequency footfall noise in wood-frame, multifamily building construction. *Journal of Acoustic Society of America*. 1994; vol. 96, no. 3.
8. BOLTON, J.; SHIAU, N.; KANG, Y. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials. *Journal of Sound and Vibration*. 1996; 191(3):317–47.
9. BRONDANI, S.A. *Pisos flutuantes: análise da performance acústica para ruídos de impacto*. 1999. 65f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 1999.
10. CONRAD, L.S. *Estudo comparativo entre diversos revestimentos para pisos quanto ao isolamento do ruído de impacto*. 2002. 142f. Dissertação (mestrado) -

- Universidade Federal de Santa Maria, 2002.
11. CREMER, L., HECKL, M., PETERSSON . *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. Hardcover, 2005.
 12. CREMER, L., HECKL, M. *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. Berlin, Springer-Verlag, 1988.
 13. DOWNEY, P. Elimination of structure-borne noise using an insulating material made from recycled rubber. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 108, pg 2463, 2000.
 14. EGAN, M. David. *Architectural acoustics*. New York: McGraw-Hill, 1988. 411p.
 15. FAHY, Frank. *Foundations of Engineering Acoustics*. London, UK: Elsevier, 2001. 443p.
 16. FAHY, Frank. *Sound and Structural Vibration: radiation, transmission and response*. London, UK: Academic Press, 1987. 309p.
 17. FUCHS G.L.; STASYSZYN, N. Airborne and impact noise level criteria for buildings. *Applied Acoustics*. Vol 12, 2003,187-194.
 18. GARCIA, D. B.; RODRIGUES, F. C. *Análise de isolamento sonoro de sistemas construtivos residenciais estruturados em aço*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
 19. HALE, M. Comparative results of field impact isolation testing of numerous resilient underlayment systems for hard-surfaced flooring. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3147, 2006.
 20. HARRIS, Cyril M. *Noise control in buildings: a guide for architects and engineers*. New York: McGraw-Hill, c.1994 1v.
 21. HARRIS, David A. *Noise Control Manual for Residential Buildings*. 1997. 385p.
 22. HAX, S. P. *Estudo do potencial dos resíduos de E.V.A. no isolamento de ruído de impacto nas edificações*. 2002. 151f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

23. HECKL, M.; RATHE, J. Relationship between the transmission loss and the impact–noise isolation of floor structures. *Journal of Acoustic Society of America*. 1963; 35(11):1825–30.
24. HIRAMITSU, A.; INOUE, K. Japanese standards and situation of studies about heavy and soft impact sources. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3205, 2006.
25. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 140-4: Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms*. Genève, Switzerland, 1998. 15p.
26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 140-7: Acoustics: measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part VII: Field measurements of impact sound insulation of floors*. Genève, Switzerland, 1998. 17p.
27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 354: Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Genève, Switzerland, 2003. 21p.
28. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 717-1: Acoustics: rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part I: Airborne sound insulation*. Genève, Switzerland, 1996. 12p.
29. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 717-2: Acoustics: rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part II: Impact sound insulation*. Genève, Switzerland, 1996. 12p.
30. JANG, J. A reduction effect of the floor impact sound after installation of the sound insulation for SMT factory. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 109, pg 2452, 2001.
31. JEON, Y.; YOO, S.; LEE, P. The effect of damping materials on heavy-weight floor impact in apartment buildings. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3146, 2006.

32. KINSLER, L.; FREY, A.; COPPENS,A.; SANDERS,J. *Fundamentals of Acoustics*. New York: John Wiley & Sons, 1982. 480p.
33. KOGA, T.; INOUE, K.; NAKAZAWA, S. Trends for prediction methods of heavyweight floor impact sound. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3206, 2006.
34. LONG, M. *Architectural Acoustics*. Burlington: Elsevier, 2006. 844p.
35. LOVERDE, J.; DONG,D. Design parameters for impact sound insulation in lightweight wood and steel structures. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 119, pg 3220, 2006.
36. LOVERDE, J.; DONG,D. Isolation of low frequency impact sounds in hotel construction. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 112, pg 2201, 2002.
37. MACHADO, J. *Análise de Vibração e ruído estrutural em piso slim floor de edifícios de aço para atender requisitos de conforto*. 2003. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
38. MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural Acoustics: principles and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 445p.
39. MEISSER, M. *Acustica de los Edificios*. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1973. 253 p.
40. MÉNDEZ, A., STORNINI, A. J., SALAZAR, E. B. et al. *Acustica arquitectonica*. Buenos Aires: UMSA, 1995. 238 p.
41. NASH, A. Resilient ceiling construction in residential buildings. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3146, 2006.
42. PETTYJOHN, S. Influence of lightweight structural design of office buildings on vibration levels due to people walking and operation of mechanical equipment. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3206, 2006.
43. PIZZUTTI, J. *Acústica aplicada às edificações*. Santa Maria: UFSM, Notas de aula. 1998. v. não paginado.

44. PUJOLLE, J. *La pratique de l'isolation acoustique des batiments*. Paris: Moniteur, 1978. 576 p.
45. QUIRT, D.; NIGHTINGALE, T. Flanking impact sound transmission in wood-framed multifamily construction. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3207, 2006.
46. RUSHFORTH, I.M.; HOROSHENKOV, M.; MIRAFTAB, M.; SWIFT, M.J. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*. Vol 66, 2005, 731-749.
47. SANCHO, V. M., SENCHERMES, A. G. *Acustica en arquitectura*. Madri: Colégio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1982. 215 p.
48. SEMPRINI, G.; COCCHI, A. Investigation on the flanking transmission of impact sound insulation of floor. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 115, pg 2581, 2004.
49. SHI, W.; JOHANSSON, C.; SUNDBÄCK, U. An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement. *Applied Acoustics*. Vol 51, 1998, 85-108.
50. SILVA, Pérides. *Acústica Arquetônica*. Belo Horizonte: EDTAL, 1997.
51. SOUZA, L.; ALMEIDA, M.; BRAGANÇA, L. *Bê-á-bá da acústica arquetônica: ouvindo a arquitetura*. São Carlos, SP: EdUFSCar, 2006. 149p.
52. TADEU, A.; PEREIRA, A.; GODINHO, J.; ANTÓNIO, J. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions. *Applied Acoustics*. Coimbra, n.68, p.17-42, Janeiro. 2007.
53. VECCI, M.A.M. *Ensaio de ruído de impacto no piso do dormitório 02 do bloco 01 - núcleo n4, do projeto habitacional COSIPA v072, Embu, SP*. 2004. 12f. Relatório Técnico - Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
54. VÉR, I. Impact noise isolation of composite floors. *Journal of Acoustic Society of America*. 1970; 50(4):1043-1050.
55. VÉR, I.; HOLMER, C. *Interaction of Sound Waves with Solid Structures*. New

York: McGraw-Hill Book Co, 1971.

56. VÉR, I.; BERANEK, L. *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, Ch 9 – Interaction of Sound Waves with Solid Structures*. New York: John Wiley & Sons, 1992.
57. WARNOCK, A.; NIGHTINGALE, T. Heavy and light impact sources to rate impact sound transmission and changes due to applied floor toppings. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 120, pg 3206, 2006.
58. WARNOCK, A. Prospects for a test procedure for rating floor toppings on joist floors. *Journal of Acoustic Society of America*. Vol 112, pg 2227, 2002.

ANEXOS

ANEXO A – Fotos das medições de ruído de impacto em pisos completamente instalados (conforme ISO 140-7: 1998)

ANEXO B – Fotos das medições de ruído de impacto em pisos simplificados (modelo 1m x 1m)

ANEXO C – Resultados e Foto das medições de Perda por Transmissão do piso (conforme ISO 140-4: 1998)

ANEXO A

Fotos das medições de ruído de impacto em pisos completamente instalados (conforme ISO 140-7)



Foto A.1: Configuração 1



Foto A.2: Configuração 2

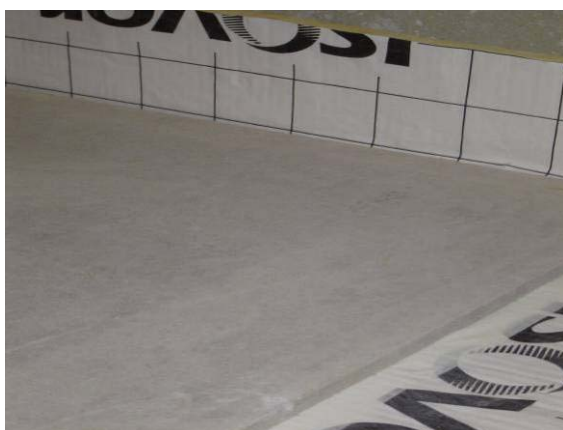


Foto A.3: Configuração 3



Foto A.4: Configuração 4



Foto A.5: Configuração 5



Foto A.6: Configuração 6



Foto A.7: Configuração 7



Foto A.8: Configuração 7



Foto A.9: Configuração 8



Foto A.10: Configuração 8



Foto A.11: Configuração 9



Foto A.12: Configuração 10



Foto A.13: Configuração 11



Foto A.14: Configuração 12



Foto A.15: Configuração 13



Foto A.16: Configuração 14



Foto A.17: Configuração 15



Foto A.18: Configuração 16

ANEXO B

Fotos das medições de ruído de impacto em pisos simplificados (modelo 1mx1m).



Foto B.1: Configuração 1



Foto B.2: Configuração 2



Foto B.3: Configuração 3



Foto B.4: Configuração 4



Foto B.5: Configuração 5



Foto B.6: Configuração 6



Foto B.7: Configuração 7



Foto B.8: Configuração 8



Foto B.9: Configuração 9



Foto B.10: Configuração 10



Foto B.11: Configuração 11



Foto B.12: Configuração 12



Foto B.13: Configuração 13



Foto B.14: Configuração 14



Foto B.15: Configuração 15



Foto B.16: Configuração 16



Foto B.17: Configuração 17



Foto B.18: Configuração 18



Foto B.19: Configuração 19



Foto B.20: Configuração 20



Foto B.21: Configuração 21



Foto B.22: Configuração 22



Foto B.23: Configuração 23



Foto B.24: Configuração 24



Foto B.25: Configuração 25



Foto B.26: Configuração 26



Foto B.27: Configuração 27



Foto B.28: Configuração 28



Foto B.29: Configuração 29



Foto B.30: Configuração 30



Foto B.31: Configuração 31



Foto B.32: Configuração 32

ANEXO C

Resultados e Foto das medições de Perda por Transmissão do piso (conforme ISO 140-4:1998)



Figura C.1: Fonte Acústica sobre isolamento, no ensaio de Perda por Transmissão

TABELA C.1 – Resultado da Perda por Transmissão da laje de concreto maciça do ambiente de ensaios de ruído de impacto de piso.

Local	Nível de Pressão Sonora [dB] - 1/3 oitava																								
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	A
12o. Andar	77	78	83	84	88	81	83	81	82	82	83	83	83	82	81	86	83	82	79	79	80	79	78	77	93
11o. Andar	55	58	57	62	64	55	52	51	49	48	46	44	41	39	35	36	30	25	20	17	16	13	12	11	53
Perda por Transmissão	22	20	26	22	24	26	31	30	32	34	37	39	42	43	46	50	53	57	59	62	64	65	66	66	40

TABELA C.2 – Verificação do isolamento do ambiente: Ruído da Castanhola – Perda por Transmissão, para laje de concreto maciça.

Frequência [Hz]	Nível de Pressão Sonora [dB] - 1/3 oitava																								
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	A
Ruído da Castanhola no 12º. Andar [dB]	32	37	69	77	71	57	65	73	70	70	73	71	71	69	67	69	72	75	74	75	75	75	76	78	85
Perda por Transmissão	22	20	26	22	24	26	31	30	32	34	37	39	42	43	46	50	53	57	59	62	64	65	66	66	40
Ruído da Castanhola - Perda por Transmissão	11	17	43	55	47	32	34	42	37	37	36	33	29	26	22	19	20	18	15	13	11	10	10	12	45