

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA APARECIDA HENNEBERG

**DESEMPENHO ACÚSTICO EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PISOS DE
EDIFICAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS DE
CONSTRUÇÃO**

CURITIBA

2022

FERNANDA APARECIDA HENNEBERG

**DESEMPENHO ACÚSTICO EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PISOS DE
EDIFICAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS DE
CONSTRUÇÃO**

**ACOUSTIC PERFORMANCE OF BUILDING'S FLOOR CONSTRUCTION
SYSTEMS WITH USAGE OF ALTERNATIVE CONSTRUCTION MATERIALS**

Tese apresentada como requisito para
obtenção do título de Doutora em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).
Orientador: Rodrigo Eduardo Catai

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



FERNANDA APARECIDA HENNEBERG

DESEMPENHO ACÚSTICO EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PISOS DE EDIFICAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS DE CONSTRUÇÃO

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 30 de Maio de 2022

Dr. Rodrigo Eduardo Catai, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alfredo Iarozinski Neto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Marcio Henrique De Avelar Gomes, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Patricia Kruger, Doutorado - Universidade Estadual de Ponta Grossa (Uepg)

Dra. Rosemara Santos Deniz Amarilla, Doutorado - Profissional Liberal

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/05/2022.

Para Pi, todo meu amor e gratidão

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Rodrigo Eduardo Catai por toda a sua dedicação, atenção e incentivo como professor e como orientador, e também por todas as diretrizes fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

Ao Professor Dr. Alfredo Iarozinski Neto, a Professora Dra. Rosemara Santos Deniz Amarilla, ao Professor Dr. Marcio Avelar, ao Professor Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro e a Professora Patrícia Kruger, pela atenção e carinho, e também por todas as importantes contribuições para conclusão desta tese.

Aos alunos de iniciação científica, e agora engenheiros civis e colegas de profissão, Raylton Souza e Valéria Beatriz Willie, pelas importantes participações nos ensaios de laboratório e rotina de pesquisa.

Ao Paulo Sabino por toda a ajuda, e diretrizes técnicas na execução da pesquisa no canteiro de obras experimental.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UTFPR, por todas as aulas ministradas, e por todo o conhecimento adquirido em sala de aula.

Ao chefe do Departamento de Projetos e Obras da UTFPR, campus Ponta Grossa, Antonio Carlos Lamp, pelas grandes contribuições técnicas no desenvolvimento desta tese, e também pelo apoio durante todo o período do doutorado. Agradeço aos colegas de trabalho Edson José Chaicoski e Antonio Sergio dos Santos por toda a ajuda e incentivo.

Agradeço a Deus, que iluminou o caminho durante todo o percurso. Agradeço com muito carinho a minha família, que de forma muito especial apoiou nos momentos de concentração e de dedicação aos estudos, em especial a minha mãe que sempre esteve comigo, e meu pai que sempre foi meu exemplo e inspiração como engenheiro civil.

E por fim, agradeço a banca examinadora, pelo tempo e atenção em relação a esta tese.

RESUMO

HENNEBERG, Fernanda Aparecida. **Desempenho acústico em sistemas construtivos de pisos de edificações com a utilização de materiais alternativos de construção**. 153 páginas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

No setor da construção civil é notável a necessidade de projetos tecnológicos com características sustentáveis, e que busquem melhores critérios de qualidade técnica e de conforto em uma edificação. Ainda, neste contexto, observa-se uma preocupação crescente em soluções construtivas que também interfiram positivamente no desempenho acústico de uma edificação. Diante desta perspectiva, o objetivo principal desta pesquisa é a concepção de sistemas especiais de contrapisos de edificações utilizando-se de materiais alternativos da construção civil, e avaliar o desempenho acústico ao ruído de impacto nos sistemas construtivos, por meio de critérios indicados pelas normas específicas vigentes, determinando de forma rigorosa o nível da pressão sonora ponderado de impacto em sistemas de pisos especiais de unidades autônomas. Para isso, caracterizou-se composições para a fabricação de sistemas especiais de pisos à base de resíduos de construção e de demolição (RCD) com critérios técnicos de qualidade e de desempenho, de acordo com o que preconiza a boa técnica de engenharia. A abordagem metodológica consistiu em uma pesquisa exploratória, a partir da busca de soluções por meio de uma pesquisa aplicada, sendo utilizado o método de procedimento técnico experimental. Com os resultados encontrados, conclui-se que todos os sistemas de pisos com os materiais alternativos utilizados nesta pesquisa apresentaram desempenho acústico compatível com soluções executivas convencionais. A presença dos revestimentos de piso atenuou o nível de ruído de impacto em todas as placas. A inserção de argila expandida nas misturas apresentou desempenho acústico superior em relação às demais composições. Entre os sistemas de pisos criados e analisados nesta pesquisa, três deles ganham destaque, sendo eles o contrapiso especial RCC1, contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural, com assentamento de piso laminado com o resultado de 45 dB; o contrapiso especial RCC3 contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso laminado com o resultado de 44 dB atingido; e o contrapiso especial RCC3 contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso em granito com o resultado de 44 dB atingido; sendo os mesmos classificados com desempenho acústico superior (≤ 45 dB) de acordo com a NBR 15575 (2021), tendo uma redução do nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos (ΔL_w) de 31 dB, 32dB e 31dB, respectivamente, em relação a laje zero da câmara acústica utilizada como valor referencial. Por fim, destaca-se, que além de atenuação sonora, os sistemas de pisos especiais construídos apresentam um grande benefício ambiental, pela reciclagem de subproduto da construção e demolição (RCD), e de outros materiais reciclados como a utilização também de raspas de borracha, oriundas do processo de recapagem de pneus.

Palavras-chave: Construção Civil. Desempenho de Edificações. Acústica. Ruído de Impacto. Construções Sustentáveis.

ABSTRACT

HENNEBERG, Fernanda Aparecida. **Acoustic performance of building's floor construction systems with usage of alternative construction materials.** 153 páginas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

In the civil construction sector, the need for technological projects with sustainable characteristics is remarkable, and that seek better criteria of technical quality and comfort in a building. Still, in this context, there is a growing concern in constructive solutions that also positively interfere in the acoustic performance of a building. In view of this perspective, the main objective of this research is to design special systems for building screeds using alternative construction materials, and to evaluate the acoustic performance to impact noise in construction systems, through criteria indicated by specific standards. regulations, rigorously determining the impact-weighted sound pressure level in special flooring systems of autonomous units. For this, compositions were characterized for the manufacture of special flooring systems based on construction and demolition waste (RCD) with technical criteria of quality and performance, in accordance with what advocates good engineering technique. The methodological approach consisted of an exploratory research, from the search for solutions through applied research, using the method of experimental technical procedure. With the results found, it is concluded that all flooring systems with the alternative materials used in this research presented acoustic performance compatible with conventional executive solutions. The presence of the floor coverings attenuated the impact noise level on all the slabs. The inclusion of expanded clay in the mixtures presented superior acoustic performance in relation to the other compositions. Among the flooring systems created and analyzed in this research, three of them stand out, being the special subfloor RCC1, containing RCD sand in the proportion of 70% and 30% of natural sand, with laminate flooring with the result of 45 dB ; the special subfloor RCC3 containing RCD sand in the proportion of 70% and 30% of natural sand and addition of expanded clay, with laminate flooring with the result of 44 dB reached; and the special subfloor RCC3 containing RCD sand in the proportion of 70% and 30% of natural sand and addition of expanded clay, with granite flooring with the result of 44 dB reached; being classified with superior acoustic performance (≤ 45 dB) according to NBR 15575 (2021), having a reduction in the weighted impact sound level on floor systems (ΔL_w) of 31 dB, 32dB and 31dB, respectively, in relation to slab zero of the acoustic chamber used as a reference value. Finally, it is noteworthy that, in addition to sound attenuation, the special flooring systems built present a great environmental benefit, by recycling construction and demolition by-products (RCD), and other recycled materials such as the use of rubber scraps. , arising from the tire recapping process.

Keywords: Civil Construction. Building Performance. acoustics. Impact noise. Sustainable Buildings.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- TRANSMISSÃO DE RUÍDO ENTRE DUAS UNIDADES HABITACIONAIS SOBREPOSTAS: A) AÉREA; B) POR IMPACTO.	28
FIGURA 2 - INTENSIDADES SONORAS PERCEBIDAS PELO OUVIDO HUMANO.....	29
FIGURA 3 - DETALHAMENTO DE UM SISTEMA DE PISO FLUTUANTE.	33
FIGURA 4 - MODELO FÍSICO SIMPLIFICADO DE UM SISTEMA DE PISO FLUTUANTE	34
FIGURA 5- FONTES DE RUÍDO DE IMPACTO.....	36
FIGURA 6 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA MEDIÇÃO DE RUÍDO DE IMPACTO.	38
FIGURA 7 - EXEMPLO GENÉRICO DE UM SISTEMA DE PISOS E SEUS ELEMENTOS.....	41
FIGURA 8 - ORIGEM DAS PATOLOGIAS RELACIONADAS ÀS ETAPAS DE CONCEPÇÃO DO EDIFÍCIO.....	45
FIGURA 9 - ESQUEMA GERAL DO PROCESSO DE BRITAGEM.	52
FIGURA 10 - SEGMENTAÇÃO DO CONSUMO DE BRITA NO BRASIL.	52
FIGURA 11 - COLETA DE RCD PELOS MUNICÍPIOS NAS REGIÕES.	60
FIGURA 12 - EVOLUÇÃO DA SITUAÇÃO NA DISPOSIÇÃO INADEQUADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO PAÍS.....	60
FIGURA 13 - DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM LOCAL INADEQUADO NA CIDADE DE CURITIBA (PARANÁ).	61
FIGURA 14 - A) INVENTÁRIO QUANTITATIVO E B) ESTRATIFICAÇÃO DOS RCDS GERADOS NAS UNIDADES RESIDENCIAIS ANALISADAS.	64
FIGURA 15 - HIERARQUIA DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.	65
FIGURA 16 - SUSTENTABILIDADE EM EDIFICAÇÕES.	71
FIGURA 17: SUSTENTABILIDADE E SUAS DIMENSÕES.	71
FIGURA 18 - PROCESSO DE AVALIAÇÃO, PONDERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO BREEAM.	74
FIGURA 19 - ÁREAS DE DESEMPENHO ANALISADAS NA CERTIFICAÇÃO LEED.....	74
FIGURA 20 - SELOS DE CERTIFICAÇÃO LEED.....	75
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.	76
FIGURA 22 - A) USINA DE RECICLAGEM SOLIFORTE LTDA.; B) AREIA PROVENIENTE DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO; C) ÚLTIMA ETAPA DO PROCESSO DA RECICLAGEM DO RCD	79
FIGURA 23 – ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA: A) PESAGEM DA AREIA APÓS COLETA NA USINA; B) SECAGEM DA AREIA DE RCD EM ESTUFA A (105 ± 2)°C.	80
FIGURA 24 - ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA: A) PESAGEM DE MATERIAL RETIDO EM PENEIRA; B) AGITADOR DE PENEIRA ELETROMECCÂNICO E; C)	

ANÁLISE VISUAL DO TAMANHO DE PARTÍCULAS DA AREIA NORMAL A ESQUERDA E DA AREIA DE RESÍDUO A DIREITA.....	80
FIGURA 25 – ELEMENTOS COMPONENTES DO RCD UTILIZADO NA PRODUÇÃO DAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	81
FIGURA 26 – CARACTERÍSTICAS E POTENCIAIS APLICAÇÕES DA AREIA DE RCD PROVENIENTE DA USINA DE RECICLAGEM SOLIFORTE LTDA.....	81
FIGURA 27 – MATERIAIS ADICIONADOS AOS SISTEMAS DE CONTRAPISO: A) RASPAS DE BORRACHA; B) ARGILA EXPANDIDA E; C) ADITIVO INCORPORADOR DE AR.....	82
FIGURA 28 – CONFECÇÃO DE ARGAMASSA COM RASPAS DE BORRACHA. A) BETONEIRA COM A MISTURA PRÉVIA; B)ASPECTO DA ARGAMASSA CONTENDO RASPAS DE BORRACHA.....	83
FIGURA 29 – CONFECÇÃO DE ARGAMASSA COM ARGILA EXPANDIDA. A) PESAGEM DA MISTURA DO AGREGADO E ARGILA EXPANDIDA B)ASPECTO DA ARGAMASSA CONTENDO ARGILA EXPANDIDA.....	84
FIGURA 30 – CONFECÇÃO DE ARGAMASSA COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR. MISTURA DA ÁGUA COM O ADITIVO.....	84
FIGURA 31- A) CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA MOLDADOS PARA CARATERIZAÇÃO POR RESISTÊNCIA MECÂNICA; B) REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	85
FIGURA 32– MOLDAGEM DAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	87
FIGURA 33– MOLDAGEM DAS PLACAS DE CONTRAPISO. A) <i>SLUMP TEST</i> ; B) VISÃO DO CANTEIRO DE OBRAS EXPERIMENTAL DURANTE O PROCESSO DE CONFECÇÃO DAS PLACAS.....	87
FIGURA 34 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS UTILIZADAS PARA CONFECÇÃO DAS PLACAS DE CONTRAPISO: A) CORPOS DE PROVA RECÉM MOLDADOS; B) REALIZAÇÃO DE ENSAIO NA PRENSA; C) CORPO DE PROVA ROMPIDO AO FINAL DO ENSAIO.....	88
FIGURA 35– COMBINAÇÃO DE PLACAS DE CONTRAPISO ANALISADAS ABRANGENDO OS TRAÇOS DE ARGAMASSA E OS TIPOS DE REVESTIMENTOS APLICADOS.....	89
FIGURA 36– CONTRAPISOS ALINHADOS PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO.....	89
FIGURA 37– MONTAGEM DE CONTRAPISO ESPECIAL SEM REVESTIMENTO (CONTRAPISO ZERO).....	90
FIGURA 38– SISTEMAS DE CONTRAPISO ESPECIAIS: A) COM REVESTIMENTO CERÂMICO; B) COM REVESTIMENTO DE PORCELANATO; C) APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO E DE PORCELANATO NAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	91
FIGURA 39– SISTEMAS DE CONTRAPISO ESPECIAIS: A) COM PISO VINÍLICO; B) COM PISO LAMINADO; C)APLICAÇÃO DE PISO VINÍLICO E LAMINADO NAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	91

FIGURA 40–SISTEMAS DE CONTRAPISO ESPECIAIS: A) COM PISO DE GRANITO; B) APLICAÇÃO DE GRANITO NAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	92
FIGURA 41- DEMARCAÇÕES NA PLACA DE CONTRAPISO PARA O POSICIONAMENTO DA <i>TAPPING MACHINE</i>	93
FIGURA 42– CÂMARA ACÚSTICA UTFPR	94
FIGURA 43– CÂMARA ACÚSTICA UTFPR: A) CORTE AA; B) CORTE BB.	95
FIGURA 44– VOLUMETRIA DA CÂMARA ACÚSTICA UTFPR.....	95
FIGURA 45 – POSICIONAMENTO DA <i>TAPPING MACHINE</i> PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO ACÚSTICO.....	96
FIGURA 46 - ANALISADOR MODELO B&K 2250 LIGHT, CLASSE 1, NA CÂMARA ACÚSTICA. A) ANALISADOR POSICIONADO NA CÂMARA RECEPTORA, A UMA ALTURA DE 1,00M DA EMISSÃO; B) ANALISADOR SENDO CALIBRADO.....	97
FIGURA 47 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO POSICIONAMENTO DA PLACA DE CONTRAPISO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS DENTRO DA CÂMARA ACÚSTICA SUPERIOR.	98
FIGURA 48 – POSICIONAMENTO DA PLACA DE CONTRAPISO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS DENTRO DA CÂMARA ACÚSTICA SUPERIOR	98
FIGURA 49 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA SALA RECEPTORA: POSIÇÕES DO ANALISADOR DE FREQUÊNCIA PARA MEDIÇÕES.....	99
FIGURA 50 – ENSAIO DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO. A) POSIÇÃO DA FONTE SONORA OMNIDIRECIONAL DODECAÉDRICA E MICROFONE; B) <i>SOFTWARE MATLAB E ITA TOOLBOX (TOOLBOX PRO MATLAB)</i>	101
FIGURA 51– CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL.	103
FIGURA 52 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO DE RCD.....	104
FIGURA 53 – NÍVEL DE PRESSÃO DE IMPACTO SONORO NORMALIZADO (L'_N) PARA A LAJE SEM CONTRAPISO, EM DECIBELS (DB).	108
FIGURA 54 – ENSAIO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	109
FIGURA 55 – GRÁFICO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	110
FIGURA 56 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL, EM DECIBELS (DB).....	113
FIGURA 57- ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONTENDO RCD (RCC1), EM DECIBELS (DB).....	114
FIGURA 58 - ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONTENDO RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2), EM DECIBELS (DB).	115
FIGURA 59 - ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONTENDO ARGILA EXPANDIDA (RCC3), EM DECIBELS (DB).....	116

FIGURA 60- ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONTENDO INCORPORADOR DE AR (RCC4), EM DECIBELS (DB).	117
FIGURA 61 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE CERÂMICA	119
FIGURA 62 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE PORCELANATO	119
FIGURA 63 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE LAMINADO DE MADEIRA.....	119
FIGURA 64 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE VINÍLICO	120
FIGURA 65 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO CONVENCIONAL CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE GRANITO	120
FIGURA 66 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RCD (RCC1) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE CERÂMICA	122
FIGURA 67 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RCD (RCC1) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE PORCELANATO	122
FIGURA 68 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RCD (RCC1) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE LAMINADO DE MADEIRA.....	122
FIGURA 69 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RCD (RCC1) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE VINÍLICO	123
FIGURA 70 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RCD (RCC1) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE GRANITO	123
FIGURA 71– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE CERÂMICA.....	124
FIGURA 72– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE PORCELANATO.....	125

FIGURA 73– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE LAMINADO DE MADEIRA	125
FIGURA 74– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE VINÍLICO	125
FIGURA 75– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM RASPAS DE BORRACHA DE PNEU (RCC2) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE GRANITO	126
FIGURA 76– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ARGILA EXPANDIDA (RCC3) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE CERÂMICA	127
FIGURA 77– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ARGILA EXPANDIDA (RCC3) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE PORCELANATO	127
FIGURA 78– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ARGILA EXPANDIDA (RCC3) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE LAMINADO DE MADEIRA	127
FIGURA 79– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ARGILA EXPANDIDA (RCC3) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE VINÍLICO	128
FIGURA 80– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ARGILA EXPANDIDA (RCC3) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE GRANITO	128
FIGURA 81– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR (RCC4) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE CERÂMICA	129
FIGURA 82– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR (RCC4) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE PORCELANATO	130
FIGURA 83– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR (RCC4) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE LAMINADO DE MADEIRA	130
FIGURA 84– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR (RCC4) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE VINÍLICO	130
FIGURA 85– ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO AO RUÍDO DE IMPACTO DO CONTRAPISO COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR (RCC4) CONTENDO REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS DE GRANITO	131

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - <i>STRING</i> DE BUSCA	26
TABELA 2 - PERCEPÇÃO DO SOM EM RELAÇÃO ÀS MUDANÇAS DE NÍVEL DE RUÍDO.....	30
TABELA 3- PROPRIEDADES DE DIVERSOS MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	37
TABELA 4 - CRITÉRIOS DE DIFERENÇA PADRONIZADA DE NÍVEL PONDERADA, $D_{NT,W}$	42
TABELA 5 - CRITÉRIOS DE DIFERENÇA PADRONIZADA DE NÍVEL PONDERADA, $D_{NT,W}$	42
TABELA 6 - CRITÉRIO E NÍVEL DE PRESSÃO SONORA DE IMPACTO PADRÃO PONDERADO, $L'_{NT,W}$	43
TABELA 7 - CRITÉRIO E NÍVEL DE PRESSÃO SONORA DE IMPACTO PADRÃO PONDERADO, $L'_{NT,W}$	43
TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	47
TABELA 9 - PRODUTOS PRODUZIDOS A PARTIR DE ARGILA COMERCIALIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	53
TABELA 10 - DESIGNAÇÃO NORMALIZADA, SIGLA E CLASSE DO CIMENTO PORTLAND.....	57
TABELA 11 - NORMAS TÉCNICAS E PUBLICAÇÕES SOBRE O GERENCIAMENTO E RECICLAGEM DE RCD.....	62
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE RISCO À POPULAÇÃO.....	63
TABELA 13- NORMATIZAÇÃO UTILIZADA PARA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO DE RCD.....	79
TABELA 14 - RESULTADOS PRELIMINARES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA INICIAIS DA PESQUISA CONTENDO AREIA DE RCD.....	85
TABELA 15- VALORES DE REFERÊNCIA PARA O IMPACTO SONORO.....	100
TABELA 16 – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO.....	102
TABELA 17- RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO CONVENCIONAL.....	102
TABELA 18 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO DE RCD.....	103
TABELA 19 – DENSIDADE APARENTE DAS ARGAMASSAS DE CONTRAPISO.....	105
TABELA 20 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA COM RELAÇÃO A ABSORÇÃO DE ÁGUA E O ÍNDICE DE VAZIOS AOS 28 DIAS.....	105
TABELA 21 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS UTILIZADAS PARA A CONFECÇÃO DAS PLACAS DE CONTRAPISO.....	106
TABELA 22- CRITÉRIO PARA ANÁLISE DO NÍVEL DE PRESSÃO DE IMPACTO SONORO NORMALIZADO.....	107
TABELA 23 – VALORES DE REFERÊNCIA DE CRITÉRIO E NÍVEL DE PRESSÃO SONORA DE IMPACTO PADRÃO PONDERADO, $L'_{N,W}$	108

TABELA 24 – ADEQUAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T), EM SEGUNDOS.....	110
TABELA 25 – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO (L_i), EM DECIBELS (DB), CAPTADOS PELO ANALISADOR DE FREQUÊNCIAS.....	111
TABELA 26 – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO (L_i) CAPTADOS NA SALA RECEPTORA AJUSTADOS COM O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T) PARA OBTENÇÃO DOS NÍVEIS DE PRESSÃO NORMALIZADOS (L'_N) EM DECIBELS (DB).....	112
TABELA 27– VALORES ABSOLUTOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA DE IMPACTO ($L'_{N,W}$), EM DECIBELS (DB), OBTIDOS NA ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO DAS ARGAMASSAS DE CONTRAPISO CONTENDO DIFERENTES REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS E SUAS CLASSIFICAÇÕES CONSIDERANDO A NBR 15575 (2021).....	132
TABELA 28– REDUÇÃO DO NÍVEL SONORO PONDERADO DE IMPACTO NOS SISTEMAS DE PISOS.....	134

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.2 PROBLEMA DA PESQUISA.....	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1. OBJETIVO GERAL	20
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	21
1.5 QUESTÕES ORIENTADORAS	22
1.6 JUSTIFICATIVAS.....	22
1.7 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	25
2.2 A ACÚSTICA E SUA RELAÇÃO COM A CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
2.2.1 RUÍDO ESTRUTURAL.....	33
2.3 O DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFICAÇÕES	34
2.3.1 MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO ACÚSTICO EM EDIFÍCIOS E ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO	36
2.3.2 NBR 15575 (2021) – DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS	40
2.3.3 REDUÇÃO DO NÍVEL SONORO NORMALIZADO DE IMPACTO ($\Delta L_{W.}$)	44
2.4 MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	44
2.4.1 METAIS	48
2.4.2 MADEIRA.....	49
2.4.3 AGREGADOS.....	50
2.4.4 MATERIAIS CERÂMICOS	53
2.4.5 AGLOMERANTES	54
2.5 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	58
2.6 SUSTENTABILIDADE	69

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	77
3.2	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	78
3.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E CONFECÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTRAPISO	82
3.3.1	SISTEMAS DE CONTRAPISO SEM REVESTIMENTO	86
3.3.2	SISTEMAS DE CONTRAPISO COM REVESTIMENTO	88
3.4	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE CONTRAPISO ESPECIAIS	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	102
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	102
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CONTRAPISOS	104
4.3	ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO DOS SISTEMAS DE CONTRAPISO	107
4.4	CÁLCULO DA REDUÇÃO DO NÍVEL SONORO NORMALIZADO DE IMPACTO.....	133
5	CONCLUSÕES.....	135
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	138
	REFERÊNCIAS.....	139

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil está em constante busca por aprimoramentos e inovações objetivando a melhoria da qualidade das edificações, aliada a racionalidade de processos executivos, segurança, durabilidade e sustentabilidade. Além disso, destaca-se uma preocupação crescente no setor com relação ao comportamento em uso de uma edificação bem como de seus sistemas, visando o bem-estar e conforto para os usuários.

Neste contexto, em 2013 entrou em vigor no Brasil a ABNT NBR 15575 Edificações Habitacionais - Desempenho, tendo a sua última atualização no ano de 2021. A referida norma brasileira determina parâmetros técnicos de desempenho para cada um dos sistemas que compõem uma edificação, estabelecendo requisitos qualitativos, critérios quantitativos e ainda métodos de avaliação, para assim poder ser comprovada a performance da edificação com relação ao conforto, e segurança na sua ocupação.

Entre os requisitos de habitabilidade da ABNT NBR 15575 (2021), destaca-se as condições de desempenho acústico de uma edificação, onde se preconiza a obtenção do conforto acústico e o bem-estar em um ambiente construído, a fim de evitar ou minimizar a transmissão de ruído aéreo e de impacto entre cômodos de uma mesma unidade residencial ou entre unidades residenciais, bem como o isolamento acústico entre o meio ambiente e as unidades residenciais.

O ruído de impacto resulta de uma ação de choque exercida diretamente sobre um elemento estrutural, de grande energia e curta duração, podendo, devido à rigidez das estruturas existentes ao longo de um edifício, propagar-se com grande facilidade por meio de toda a estrutura para os espaços de utilização, estabelecendo campos sonoros muitas vezes de grande intensidade. Por este fato, o ruído de impacto pode ter maior abrangência que o ruído aéreo, sendo muitas vezes um desafio técnico considerável na criação de condições de conforto acústico em um edifício (PATRÍCIO, 2018).

Diante desta problemática, destaca-se a importância de pesquisas que auxiliem a obtenção do desempenho acústico ao ruído de impacto em uma edificação. Define-se ruído de impacto os sons gerados por movimentos sobre superfícies, onde por sua natureza o mesmo tem capacidade de excitar uma estrutura em uma ampla faixa de frequências, devido ao movimento vibratório

induzido pela excitação localizada. A transmissão de ruído de impacto entre duas unidades habitacionais sobrepostas em uma edificação se produz por meio do próprio sistema de piso (transmissão direta) e os elementos laterais ou paredes (transmissão indireta). Essas transmissões dependem das propriedades das soluções construtivas e das uniões entre elas (BRASIL, 2015). Entre os fatores que interferem na transmissão do ruído de impacto em uma edificação estão: a rigidez e espessura da laje; a densidade dos materiais utilizados; as armaduras da laje em concreto armado; forma de vinculação das bordas da laje na estrutura e da alvenaria (MAGALHÃES, 2013).

Além disso, como forma de desenvolvimento tecnológico e sustentável, o setor da construção civil necessita de projetos que viabilizem o desempenho das suas edificações, e ainda se utilizem de materiais sustentáveis, ou seja, de produtos que ofereçam benefícios ambientais, sociais e econômicos enquanto protegem o meio ambiente ao longo de todo o seu ciclo de vida. Neste cenário, destaca-se a necessidade da concepção de soluções construtivas produzidas a partir de materiais ou componentes de descarte. De acordo com Buratti *et al.* (2016), estes materiais representam uma excelente alternativa do ponto de vista ambiental, permitindo a redução da quantidade de resíduos a serem tratados. Destaca-se a possibilidade de aplicabilidade dessas soluções também na busca de maximizar as propriedades térmicas e acústicas de sistemas construtivos. Em particular, os materiais com alta porosidade são muito interessantes para melhorar o isolamento acústico, diminuindo a dissipação do som que entra na matriz.

Não obstante o intenso consumo de recursos naturais, salienta-se que os empreendimentos de construção civil resultam na geração de grande quantidade de Resíduos de Construção e de Demolição (RCD), e utilizam-se de enormes quantidades de energia que causam impactos ambientais negativos e significativos, os quais representam um grave problema em muitas cidades. A disposição irregular desses resíduos está associada a problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública, além da sobrecarga dos sistemas de limpeza pública municipais, haja vista que, no Brasil, em 2020, foram coletadas pelos municípios cerca de 47 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2021).

Portanto, de acordo com Yusof *et al.* (2017), há uma crescente necessidade da busca agressiva e imediata de práticas ambientais no setor da construção civil, onde sugere-se que o suporte organizacional; a pressão da sociedade como cliente;

a necessidade de cumprimento de leis e regulamentações técnicas; e, a implementação de reaproveitamento de resíduos de construção e de demolição, possuem efeitos positivos significativos na adoção cultural e progressiva das práticas ambientais em projetos de construção, e na construção de edificações sustentáveis.

1.1 Contextualização do Problema

Observa-se no âmbito geral da construção civil que o setor se apresenta como grande gerador de resíduos. No Brasil, onde boa parte dos processos construtivos é essencialmente manual e cuja execução se dá no canteiro de obras, os resíduos de construção e de demolição, além de potencialmente degradadores, ocasionam problemas logísticos e financeiros às construtoras e à sociedade (NAGALLI, 2015).

Muitas vezes, o gerenciamento adequado de resíduos sólidos da construção civil, que busca antever, controlar e gerir a manipulação dos resíduos de obras ainda encontra obstáculos como o desconhecimento da natureza dos resíduos, a ausência de cultura de separação, e a falta de estudos de aplicabilidade dos mesmos (IPEA, 2016). De acordo com Yuan e Shen (2011) as pesquisas sobre a utilização de resíduos de construção e de demolição ainda não são sistemáticas, e precisam de maior aprofundamento para que viabilizem a sua aplicação.

Esse assunto vem ganhando importância e destaque no cenário nacional, em decorrência da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2010, que regulamentou o setor, impondo diversas obrigações aos governantes e às corporações, buscando sempre a qualidade produtiva, da segurança, e ambiental em todas as obras (NAGALLI, 2015).

Uma das formas de se reduzir este passivo ambiental gerado em canteiros de obras, é utilizando os resíduos de construção e de demolição como agregados na fabricação dos mais diversos materiais de construção civil. Assim, observa-se a necessidade de criação de uma cultura empresarial e na sociedade com relação a utilização de resíduos de construção e de demolição. Destaca-se que, muitas empresas ainda não utilizam esse material em processos tecnológicos na execução de edificações pela falta de parâmetros e de estudos que aumentem a percepção dos benefícios para a empresa, o empreendimento, e para o meio ambiente.

Assim, conforme salientam Oncea *et al.* (2018), além da problemática da grande geração de resíduos de construção e de demolição pelo setor da construção civil, o tema relacionado ao conforto acústico tornou-se uma preocupação cada vez maior para a engenharia civil. Assim, viabiliza-se a possibilidade de uma conexão que contribua positivamente para reduzir o impacto ambiental dos resíduos ao mesmo tempo em que traz benefícios ao aumento do conforto acústico. Essa conexão pode consistir no uso de vários resíduos de construção e de demolição no desenvolvimento de novos materiais que podem ser utilizados em obras para melhorar o desempenho acústico, onde busca-se a qualidade igual ou superior aos materiais convencionais.

Além disso, Borges *et al.* (2018) destacam que nem sempre soluções convencionais executivas atingem o desempenho técnico acústico esperado nas edificações no Brasil. Bistafa (2011), ressalta que para se atingir a redução de sons de impacto desejado é recomendado a utilização de material resiliente e isolador entre a laje e o contrapiso. Como exemplos de materiais resilientes destaca-se a borracha reciclada, cortiças, emulsões asfálticas, espuma de polietileno, lã mineral, lã de pet, mantas elastoméricas, sistemas mistos de borracha, cortiça, uniformemente distribuídos, ou placas contínuas de lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido elastizado, entre outros materiais. Desta forma, a busca pelo desempenho acústico em sistemas de pisos, conforme afirma Pereira *et al.* (2014), têm motivado a indústria a desenvolver materiais e soluções que permitam o aumento do isolamento acústico no sistema construtivo, entre unidades de edificações.

Destaca-se que, desde o ano de 2013 no Brasil, com a implementação da norma de desempenho e conseqüentemente a exigência pelo desempenho acústico nas edificações no seu pós uso, cada vez mais as construtoras estão buscando a utilização de materiais que auxiliem no conforto acústico do ambiente construído, porém muitas vezes não encontram parâmetros para a escolha dos materiais que podem colaborar para a atenuação do ruído de impacto.

Portanto, levando-se em conta a necessidade do desenvolvimento do desempenho acústico ao ruído de impacto em sistemas de pisos de edificações e o crescimento acelerado da quantidade de resíduos gerados pela construção civil, observa-se a necessidade de pesquisas na área. Com base na importância do assunto para a sociedade e para o setor da construção civil, esta tese busca ampliar

a pesquisa de desempenho acústico ao ruído de impacto em edificações utilizando-se de resíduos de construção e de demolição.

1.2 Problema da Pesquisa

Esta pesquisa busca demonstrar a funcionalidade de resíduos de construção e de demolição em contrapisos especiais de edificações. Desta forma, o seu desenvolvimento consistiu na confecção de contrapisos denominados especiais, utilizando como agregado a areia proveniente de resíduos de construção e de demolição, em diferentes traços, além da adição de resíduos de borracha, argila expandida e aditivo incorporador de ar, com o posterior assentamento dos pisos mais utilizados em edificações, para verificação de suas propriedades mecânicas, com a análise acústica minuciosa destes sistemas de contrapisos especiais executados, comparando-os com a sua execução convencional.

Contudo, este trabalho não só desenvolverá e analisará quais as melhores composições possíveis para confecção de contrapisos especiais a partir de resíduos de construção e de demolição, mas também far-se-á algo inédito no Brasil, que é a avaliação acústica de cada conjunto de contrapiso especial com diferentes tipos de pisos instalados, comparando ainda os mesmos com os processos executivos convencionais, verificando assim a viabilidade da utilização de resíduos de construção e de demolição e a aplicabilidade em obras de construção civil.

Considerando o contexto supracitado, pretende-se responder a seguinte questão: A utilização de materiais alternativos em sistemas de contrapisos e pisos especiais, pode atender os critérios de desempenho acústico de acordo com o que preconizam as normas vigentes, em um sistema construtivo?

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Esta tese tem como objetivo geral a concepção de sistemas especiais de contrapisos de edificações utilizando-se de materiais alternativos da construção civil, e em conjunto com os assentamentos dos pisos mais utilizados no mercado, avaliar o desempenho acústico ao ruído de impacto nos sistemas construtivos, por meio dos critérios indicados pela normas específicas vigentes.

1.3.2. Objetivos específicos

A pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver sistemas de contrapisos especiais a partir da utilização de resíduos de construção e de demolição;
- Desenvolver contrapisos especiais com resíduos de construção e de demolição, adicionando em sua composição insumos de materiais resilientes e aditivos;
- Caracterizar as composições químicas, mineralógicas e granulométricas dos materiais utilizados para a elaboração das argamassas, que se utilizam de insumos alternativos de construção;
- Analisar o sistema construtivo de contrapiso montado a partir de argamassas com materiais alternativos, com relação às suas propriedades mecânicas e acústicas;
- Verificar a relação entre as propriedades mecânicas das argamassas elaboradas, e o seu desempenho acústico.

1.4 Delimitação do Problema

Esta pesquisa, limita-se à confecção de quatro sistemas de contrapisos especiais a partir da utilização de areia oriunda de resíduos de construção e de demolição, com a inserção de raspas de borrachas do processo de recapagem de pneus, argila expandida, e aditivo incorporador de ar na sua composição, com o intuito de verificar o seu desempenho acústico e comparar com sistemas de contrapisos executados convencionalmente. Desta forma, apresenta-se a curva granulométrica característica da areia oriunda de resíduos de construção e demolição utilizada na pesquisa, bem como teor médio de material pulverulento e a porcentagem de umidade média da amostra, limitando os resultados a caracterização do material em questão, tendo a possibilidade de novas pesquisas utilizando-se da metodologia empregada nesta tese com a aplicação de outros materiais alternativos. Ainda, destaca-se que se optou por escolher o canteiro de obras experimental e o laboratório de acústica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, como local de realização dos ensaios desta pesquisa.

1.5 Questões orientadoras

Para atender o objetivo geral proposto nesta pesquisa, tem-se as seguintes questões orientadoras para direcionamento dos ensaios acústicos e de resultados esperados:

- Obtenção do nível de pressão sonora de impacto (L_n), do valor único ponderado ($L_{n,w}$) e a obtenção da diferença de isolamento acústico entre os sistemas com a utilização dos sistemas de contrapisos especiais criados (ΔL_w);
- Comparar o desempenho acústico de sistemas de contrapisos especiais com contrapisos executados convencionalmente, juntamente com os pisos mais utilizados na construção civil;
- Verificar a melhora do isolamento acústico proporcionada por pavimentos diferenciais, em laboratório, utilizando a metodologia descrita nas normas específicas vigentes, que requer o uso de câmaras acústicas.

1.6 Justificativas

Na construção civil, cada vez mais busca-se integrar aspectos econômicos, sociais e ambientais para o desenvolvimento sustentável de um empreendimento. Esta integração demanda em mudanças significativas na forma de conceber, projetar, construir e gerenciar uma obra.

De acordo com a definição de sustentabilidade, conforme o contido na EN 16309:2014 - "Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação do desempenho social dos edifícios - Metodologia de cálculo", devem ser levados em consideração para projetar, analisar e avaliar edificações os aspectos e consequências ambientais, econômicos e sociais, também chamados de "Três Pilares da Sustentabilidade".

Logo, observa-se a urgência de iniciativas para a melhoria das condições que englobam os três pilares de sustentabilidade no setor da construção civil, com uma mudança de foco do consumo de energia, para uma grande variedade de indicadores de desempenho de construções em seu ciclo de vida completo. Isso implica uma visão mais ampla, não só baseada nas questões ambientais, mas

também no desempenho econômico e social dos edifícios. Um olhar mais atento sobre desempenho de uma edificação em âmbito internacional revela que o desempenho acústico e a proteção contra ruído são vistos como uma parte fundamental dos aspectos de sustentabilidade social de um edifício (DOLEZAL; GLASL, 2015).

Neste cenário, a indústria da construção civil é bem conhecida como fonte de impactos ambientais negativos, associados tanto à sua produção, como à extração de matérias-primas e à execução de seus projetos (DONG; NG, 2015). Alguns dos impactos mais significativos causados pelo setor estão ligados à geração de resíduos de construção e de demolição, que podem ser caracterizados como uma mistura de materiais excedentes decorrentes de atividades de construção, reforma e demolição de obras (WON; CHENG, 2017). Portanto, destaca-se a necessidade constante de inovação tecnológica quanto ao controle e reaproveitamento de resíduos de construção civil.

Com relação ao desempenho acústico, de acordo com Buratti *et al.* (2016), a estrutura dos materiais que contribuem com o isolamento acústico geralmente é baseada em meios sintéticos porosos (lã de rocha, lã de vidro, poliuretano, poliéster, etc.), que têm processos de produção caros, importantes consumos de energia e alto impacto ambiental. Em contrapartida, os materiais reciclados estão se tornando uma alternativa interessante, devido ao seu bom comportamento acústico, semelhante aos materiais porosos tradicionais. Eles também permitem custos de produção de baixo impacto, graças ao uso de resíduos derivados de outros ciclos de produção.

Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de técnicas aplicadas no setor da construção civil, por meio de avaliação e caracterização de materiais de sistemas de pisos com materiais alternativos para o aumento do isolamento acústico em sistemas construtivos. Ainda, espera-se conduzir os estudos em busca da implementação de resíduos de construção civil em sistemas de pisos que atendam o desempenho acústico de acordo com o que preconiza a ABNT NBR 15575 (2021).

A temática da tese é inovadora no que diz respeito ao aproveitamento de resíduos de demolição e de construção para confecção de sistemas de contrapisos especiais e determinação do seu nível de desempenho acústico ao ruído de impacto. Enfatiza-se o caráter socioambiental deste projeto, pois, utiliza-se de resíduos reciclados, evitando a extração de matéria-prima da natureza e também

minimizando os impactos ao meio ambiente com relação a destinação desses materiais.

Assim, englobando os aspectos sociais, econômicos e ambientais característicos de obras sustentáveis, a pesquisa desta tese proporciona resultados que objetivam a melhoria da qualidade de vida das pessoas por meio da concepção de ambientes que possuem maior conforto acústico, e também contribuindo com o meio ambiente, evitando a destinação inadequada dos resíduos e a extração de matéria-prima para a confecção de argamassas e de materiais isolantes. Além disso, com o aumento de pesquisas na área que incentivam a utilização de materiais alternativos reciclados para argamassas, comprova-se a viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição, onde incentiva-se o aumento da demanda deste material, tendo como um possível resultado a expansão de novas usinas de reciclagem, gerando novos nichos de mercado e empregos diretos e indiretos.

1.7 Estruturação do trabalho

A introdução, a contextualização do problema, o objetivo geral, os objetivos específicos, a formulação do problema, a delimitação do tema, as questões orientadoras e as justificativas da pesquisa estão apresentados no primeiro capítulo. Neste primeiro capítulo destaca-se a relevância do tema na área de construção civil, e os objetivos que se pretendeu alcançar com a pesquisa.

No segundo capítulo são relatadas as conceituações, legislações vigentes e abordagens teóricas relevantes ao tema da tese. São destacados os artigos científicos nacionais e internacionais, bem como livros publicados com considerações pertinentes sobre os temas macros desta pesquisa: materiais de construção civil, conceitos de acústica, sustentabilidade, resíduos de construção e de demolição, e desempenho acústico de edificações.

No terceiro capítulo é apresentada a abordagem metodológica, os procedimentos adotados para o desenvolvimento da tese, e a caracterização da análise dos dados. Os resultados foram compilados e apresentados no quarto capítulo, expondo dados, as análises obtidas e considerações. No quinto capítulo relatam-se as conclusões proporcionadas pela pesquisa, que consiste em uma análise quanto ao cumprimento dos objetivos propostos, e aplicação do método.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo apresenta-se aspectos referentes aos conceitos de acústica na construção civil seguido pelas definições de desempenho das edificações em relação a esse parâmetro; aos materiais de construção civil com ênfase nos resíduos de construção e demolição; e, por fim, a sustentabilidade com intuito de contextualizar a proposta descrita no presente trabalho.

2.1 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática da literatura é uma revisão específica que localiza os estudos existentes, seleciona e avalia contribuições, analisa e sintetiza dados e relata as evidências de maneira a permitir que conclusões razoavelmente claras sejam alcançadas sobre o que é e o que não é conhecido (PAGANI, 2017). A mesma não deve ser considerada uma revisão no sentido tradicional, mas um projeto de pesquisa independente que explora uma questão claramente especificada, usando estudos existentes. Ela se utiliza de princípios distintos e exigentes (DENYER; TRANFIELD, 2009), agregando valor ao desenvolvimento de uma pesquisa. Desta forma, no trabalho científico, para se obter grande relevância, além da pesquisa de campo e seus resultados, a revisão sistemática de literatura deve ser um produto com grande contribuição científica.

Entre as ferramentas utilizadas para revisão sistemática, nesta pesquisa utilizou-se as bases de dados bibliográficos *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*; e gerenciadores de referencias, onde optou-se pelo *Mendeley* e o *JabRef*, e por fim o *Microsoft Excel* para a planilha final de tratamento dos dados encontrados.

A partir da escolha das bases de dados, realizado um levantamento da produção acadêmica, publicada em periódicos e eventos, que cobrem o assunto a ser pesquisado.

Foram selecionados artigos que continham essas palavras no título, no corpo textual e/ou palavras-chave no artigo. Com base nessa seleção, foram listadas novas palavras-chaves e com o auxílio de operador booleano “OR”, foi possível fazer combinações com essas palavras-chave para orientar a pesquisa na base de dados. Com o auxílio de outro operador booleano, “AND”, foi possível criar um *string*

de busca para delimitar melhor a pesquisa na base de dados. Segundo Maia e Iarozinski Neto (2015) um *string* de busca é um arranjo conveniente, com operadores booleanos, das palavras-chave encontradas com objetivo de extrair da base de dados as publicações relevantes ao tema da pesquisa. A Tabela 1 apresenta as principais palavras-chave e combinações utilizadas na pesquisa.

Tabela 1 - String de busca

Combinação 1	<i>"Impact Sound Insulation" OR "Acoustical properties" OR "Sound insulation of building") AND ("laminated timber floor" OR "Floating floor"</i>
Combinação 2	<i>("Impact Sound Insulation" OR "Acoustical properties" OR "Sound insulation of building") AND ("Mechanical properties" OR "Recycled Rubber" OR "laminated timber floor" OR "Floating floor" OR "Recycled aggregate")</i>

Fonte: a autora (2022)

2.2 A acústica e sua relação com a construção civil

O som pode ser conceituado como um fenômeno físico produzido pelo movimento ondulatório das partículas no próprio ar ou em algum meio elástico, podendo ser ou não audível ao ser humano (GERGES, 1992; EVEREST, 2001; PAVANELLO, 2014). Associado ao som surge o ruído, o qual pode ser descrito como um som indesejável, desagradável ou ainda estar relacionado a sons que geram danos à saúde e ao meio ambiente (MURGEL, 2007; BISTAFA, 2011).

Baseando-se no conceito de ruído fica evidente a necessidade de um ouvinte para classificar determinado som como ruído (LONG, 2006; PAVANELLO, 2014). A inserção do ouvinte nesse parâmetro resulta em uma complexidade de análise, visto que o julgamento de cada indivíduo em relação ao som varia considerando as circunstâncias da exposição, o contexto local e até o emprego de determinado ruído para passagem de informações, no caso de alarmes e sirenes (BARBOSA, 2011; BISTAFA, 2011).

Em Teoria da Informação, designa-se por ruído qualquer interferência que afete negativamente a percepção de um sinal que carrega a informação. A Teoria da Comunicação adaptou o conceito de ruído para designar tudo aquilo que perturbe a transmissão de mensagens entre emissor e receptor. Existem muitas fontes de ruídos, isto é, fatores que podem impedir a transmissão da informação. É

possível classificá-los em 5 principais categorias de ruídos, sendo: físicos, técnicos, psicológicos, fisiológicos e semânticos (TUDE SÁ, 2019) . Os ruídos podem afetar o plano da produção da mensagem, o plano da recepção ou ocorrer caminho entre a emissão e a recepção. A mensagem final consiste em uma mistura de sinal e de ruído. Se a quantidade de sinal for maior, a comunicação fica assegurada; se pelo contrário a quantidade de ruído for maior, deverão ser ativados mecanismos de redundância para manter a troca de mensagens entre emissor e receptor (WOLF, 1999).

O desconforto acústico possui uma concepção subjetiva e há dificuldade dos pesquisadores da área em avaliar quantitativamente essa propriedade. No entanto, é de conhecimento geral que a presença constante de ruído interfere diretamente na qualidade de vida dos indivíduos, com efeitos psicológicos e sociais, como irritação, stress, queda de desempenho, perturbação do sono, desentendimentos e constrangimentos (BISTAFA, 2011; CBIC, 2013; BORGES *et al.*, 2018; MINERVINO, 2018; FERREIRA; DE JESUS RIBAS; DE PAULA, 2020; MARTINS *et al.*, 2020).

O som pode ser transmitido em um espaço de duas formas: por via aérea e pela estrutura em si, sendo que pode ser propagado através de vibrações (SALES, 2001). Para classificar a capacidade de determinado elemento construtivo em transmitir ou isolar o som temos o coeficiente de transmissão sonora, apresentado na Equação 1 (BISTAFA, 2011; MAGALHÃES, 2019):

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

τ = Coeficiente de transmissão sonora do elemento (adimensional)

W_t = Potência sonora transmitida (W)

W_i = Potência sonora incidente (W)

Quanto menor o valor desse coeficiente maior capacidade de isolamento o elemento possui e maior é a perda sonora que ocorre no processo da transmissão (BISTAFA, 2011; MAGALHÃES, 2019). Por meio dessa propriedade é possível encontrar a perda de transmissão sonora que ocorre ao se dividir a energia do som durante o seu processo de propagação pelo elemento: partes são refletidas,

absorvidas, dissipadas em calor e propagadas através do meio (SALES, 2001; HASSAN, 2009). Na Equação 2 está expressa a relação da perda sonora, sendo esta inversamente proporcional ao coeficiente de transmissão sonora já apresentado (Equação 1).

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Equação 2})$$

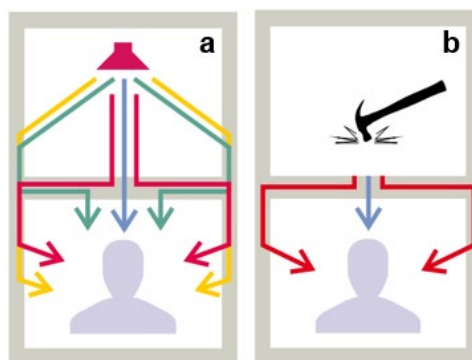
Onde:

PT = Perda na transmissão sonora (dB)

τ = Coeficiente de transmissão sonora do elemento (adimensional)

Em relação ao ruído, Pierrard e Akkerman (2013) descrevem que sua transmissão ocorre entre ambientes de forma aérea (Figura 1a), utilizando-se do sistema de piso (1 via de transmissão direta) e dos elementos laterais (12 vias de transmissão indireta); ou por impacto (Figura 1b), pelo sistema de piso (1 via de transmissão direta) em soma com os elementos laterais (4 vias de transmissão indireta). A transmissão depende das propriedades das soluções construtivas, da união entre os ambientes e da geometria dos mesmos (PIERRARD; AKKERMAN, 2013; AMÂNCIO *et al.*, 2019).

Figura 1- Transmissão de ruído entre duas unidades habitacionais sobrepostas: a) Aérea; b) Por impacto.



Fonte: Adaptado de Pierrard e Akkerman, 2013.

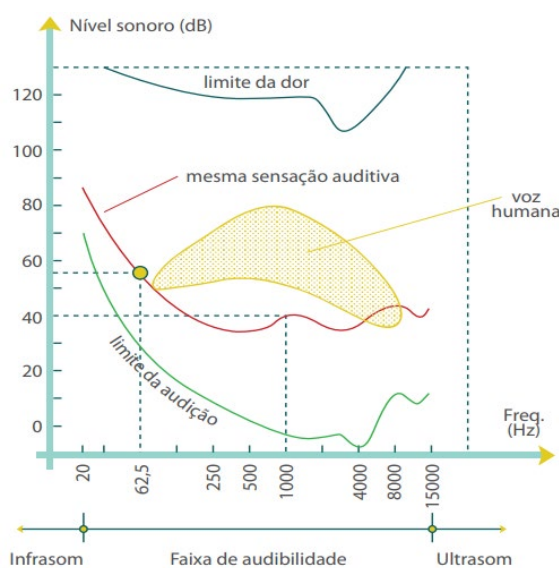
A ABNT NBR 10152 Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos e edificações, foi publicada inicialmente no ano de 1987, com a última atualização no ano de 2021, e têm por objetivo estabelecer o procedimento para execução de medições de níveis de pressão sonora em ambientes internos de edificações; procedimento para determinação do nível de pressão sonora

representativo de um ambiente interno a uma edificação; procedimento e valores de referência para avaliação sonora de ambientes internos a edificações, em função de sua finalidade de uso; valores de referência de níveis de pressão sonora para estudos e projetos acústicos de ambientes internos a edificações.

Mas apenas no ano de 2013, entra em vigor a ABNT NBR 15.575 - Edificações habitacionais - Desempenho, que trata dos padrões de qualidade, segurança e de conforto necessários para as edificações, e estabeleceu níveis que devem ser cumpridos em indicadores como o desempenho acústico, térmico, durabilidade da edificação, e a sua vida útil, representando uma mudança de paradigma para o mercado da construção civil, e também para o usuário final. A versão atual da normativa (2021) relacionada à acústica define valores de referência considerando a preservação da saúde e bem-estar dos indivíduos e a utilização do espaço.

Com relação ao conforto acústico, a intensidade sonora que o usuário capta depende da frequência e do ruído residual. Conforme a Figura 2 (CBIC, 2013), a sensação auditiva permanece a mesma em uma faixa de 40 dB, com frequência de 1000 Hz, a 55 dB, com frequência de 62,5 Hz. Pelas curvas é possível visualizar que o ouvido humano é menos sensível para sons com frequências abaixo de 1000 Hz e acima de 4000 Hz; e que o limite de início da dor está acima dos 100 dB (CBIC, 2013).

Figura 2 - Intensidades sonoras percebidas pelo ouvido humano.



Fonte: CBIC (2013).

Na Tabela 2 estão apresentados intervalos de percepção do ruído pelos indivíduos quando este excede um som de referência, baseados nos estudos levantados por Mehta, Johnson e Rocafort (1999). Ressalta-se que, pelos dados, a percepção de ruído é nítida com um aumento de 5 dB, ponderados em A, modelando o comportamento do ouvido humano de forma padronizada, acima do som de referência.

Tabela 2 - Percepção do som em relação às mudanças de nível de ruído.

Valor em que o ruído excede a referência (dB (A))	Percepção do som
1	Imperceptível
3	Perceptível
5	Claramente perceptível
10	Mudança substancial
15	Grande diferença

Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999) *apud* Ferreira Neto (2009).

Park, Lee e Jeong (2018) avaliaram os efeitos da sensibilidade ao ruído em 34 indivíduos considerando suas respostas psicofisiológicas. Uma bola de impacto e duas fontes de impacto reais (caminhada de um adulto e a corrida de uma criança) foram utilizados como ruído de impacto no solo. Em soma, o ruído de tráfego rodoviário foi aplicado como fonte de ruído externo. Após exposição por 5 minutos consecutivos ao ruído, os participantes classificaram seu incômodo com cada estímulo. Além da classificação, a frequência cardíaca, a atividade eletrodérmica e a frequência respiratório foram acompanhadas ao longo do processo de exposição.

Os autores (PARK; LEE; JEONG, 2018) detectaram que as classificações de incômodo ao ruído aumentaram à medida que os níveis de ruído foram crescendo, para todos os estímulos. As medidas fisiológicas monitoradas variaram significativamente com a duração da exposição aos ruídos, e o grupo de alta sensibilidade mostrou mudanças mais pronunciadas nas respostas fisiológicas observadas. É levantado, por fim, que mais estudos são necessários para confirmar as variações fisiológicas observadas, com foco em exposições reais, e que análises

como essa contribuem para a criação de diretrizes que considerem o caráter subjetivo de sensibilidade dos indivíduos expostos a ruídos.

Em contrapartida ao ruído e seus efeitos, levanta-se o conceito de conforto acústico, o qual consiste na inexistência de som indesejável ou incômodo e está relacionado com um sentimento de bem-estar, tranquilidade emocional e satisfação dos usuários (RASMUSSEN, 2004; MINERVINO, 2018). O conforto pode ser analisado de forma subjetiva ou estar conectado a exigências objetivas, como os parâmetros normativos relacionados à acústica dos materiais e ambientes.

A solução para otimizar o conforto acústico dos ambientes consiste na atenção aos seguintes itens (CARVALHO, 2010):

- a) Garantir audibilidade no local, pelas absorções acústicas dos revestimentos internos (paredes, tetos, pisos) e/ou em função da geometria interna, fazendo uso dos recursos de reflexões;
- b) Minimizar os ruídos externos que irão possivelmente gerar incômodos e impactar na boa audibilidade do local;
- c) Atenuar os possíveis ruídos internos para não resultar em incômodo no entorno.

Uma das formas de atingir o conforto acústico é empregando materiais com desempenho acústico adequado ou melhorado. A evolução tecnológica dos materiais de construção civil e da sua análise gerou campo para pesquisas voltadas ao desempenho acústico e a potencialidade dos materiais comumente aplicados em edificações.

Borges *et al.* (2018) utilizaram resíduos de espuma vinílica acetinada (EVA) e casca de arroz para produzir placas cimentícias de contrapiso com o objetivo de avaliar redução de ruído por impacto. Foram conduzidos testes de rigidez dinâmica, fluência compressiva e isolamento de som de impacto em placas com resíduos de EVA e casca de arroz nos teores de 25, 50 e 75% em volume, em substituição ao agregado graúdo.

Os autores (BORGES *et al.*, 2018) constataram que ambos os resíduos, industrial ou orgânico, são alternativas favoráveis para reduzir o ruído por impacto em sistemas de piso, apresentando redução na densidade do contrapiso o que

atenuou a propagação da vibração e aumentou o isolamento do som de impacto desse material. Logo, ressaltou-se que materiais aplicados em sistemas de piso contendo tais resíduos constituem uma forma de aproveitamento, com redução da carga total da construção e melhoria no aspecto acústico da edificação.

Führ *et al.* (2021) desenvolveram argamassas de contrapiso contendo vermiculita expandida e serragem de cromo para comparação com uma argamassa padrão com propriedades de isolamento acústico. Os materiais analisados foram adicionados às argamassas em substituição ao agregado miúdo nos teores de 0%, 10%, 30%, 50% e 70% em volume, para a vermiculita, e nos mesmos teores para a serragem de cromo em soma com o teor de 90% de substituição. Além da caracterização das argamassas, foram realizados testes de rigidez dinâmica e redução de ruído por impacto para avaliar as variações nas propriedades acústicas dos materiais.

As argamassas contendo os materiais estudados apresentaram redução nos valores de rigidez dinâmica, atingindo valores inferiores ao da argamassa padrão, o que melhorou o desempenho acústico dos contrapisos. Além disso, independente do teor de material adicionado, os resultados demonstraram que as argamassas contêm maior potencial de atenuação de ruído de impacto em comparação à argamassa padrão. Em conclusão, os autores (FÜHR *et al.*, 2021) apontam que por meio dos resultados obtidos, em referência à argamassa comercial padronizada, as argamassas confeccionadas têm potencial para material alternativo com objetivo de isolamento de ruídos de impacto em sistemas de piso.

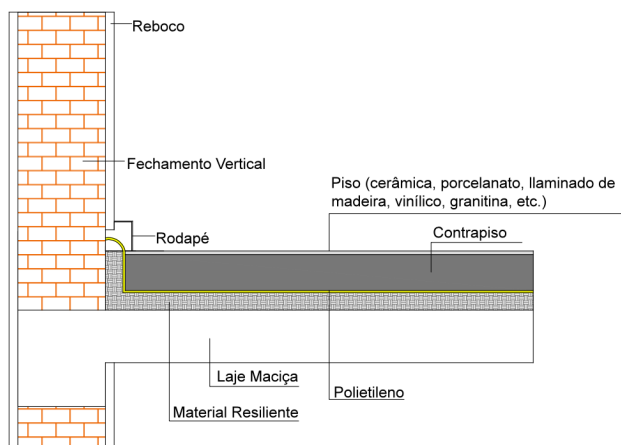
Cada vez mais o conforto acústico vem sendo exigido nas edificações com intuito de proporcionar condições adequadas ao usuário para usufruir de seu espaço sem interferir no cotidiano de outros indivíduos (FERREIRA NETO, 2009; MINERVINO, 2018; SANTOS, 2020). Rezende, Rodrigues e Vecci (2014) apontam que, no Brasil, é tradicional desconsiderar a adequação acústica das edificações e esta é negligenciada desde a fase do projeto arquitetônico. Neto e Bertoli (2008) enfatizam ainda que muitas vezes o conforto acústico só é considerado quando o usuário começa a residir no local e os ruídos se tornam parte do dia-a-dia.

Logo, estudos como o proposto nesse trabalho podem identificar problemas previamente; melhorando o desempenho geral dos materiais de construção civil empregados, reduzindo prejuízos futuros com adequação de espaços e aumentando a satisfação dos usuários das edificações.

2.2.1 Ruído Estrutural

Conforme Magalhães (2013) destaca, o conhecimento do fenômeno da transmissão do ruído estrutural é muito importante para determinar o conforto acústico em um ambiente. O piso (laje estrutural) de uma determinada edificação pode vibrar e irradiar energia para o andar imediatamente inferior. Ainda, o mesmo piso pode não somente irradiar energia sonora para aquele pavimento, mas também transmitir energia sonora para os componentes ligados a ele, como as paredes, passando as mesmas a vibrar e irradiar energia sonora. Assim, de uma maneira geral, o isolamento do ruído estrutural é o conjunto de medidas mitigadoras que visam interromper ou diminuir o fluxo de energia sonora de uma estrutura para o ar ou outro componente estrutural. Na Figura 3, exemplifica-se um sistema de piso flutuante.

Figura 3 - Detalhamento de um sistema de piso flutuante.



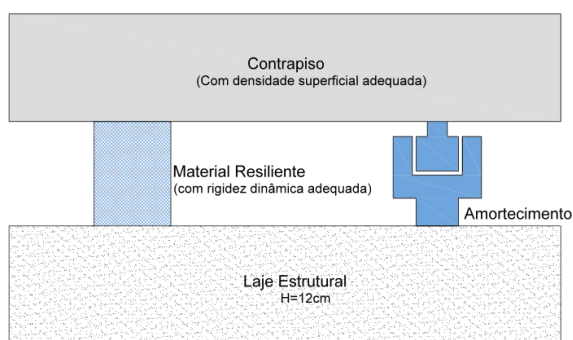
Fonte: adaptado de Bistafa (2011).

Assim, conforme ilustrado na Figura 3, define-se como piso flutuante o sistema construtivo composto por um elemento rígido, um contrapiso, sobre um material resiliente, que o desvincula dos elementos estruturais e de vedação do edifício. Ainda, destaca-se que para que as vibrações induzidas no contrapiso pelos choques não se transmitam para outros pontos da estrutura, é também importante que o contrapiso fique completamente isolado não só da laje estrutural, mas também dos fechamentos verticais como paredes, e elementos de acabamento como o

rodapé. O contrapiso flutuante é mais efetivo para isolamento ao ruído de impacto, tendo pouco efeito no isolamento ao ruído aéreo (BRASIL, 2015).

Ainda, um modelo físico simplificado de sistemas de pisos com redução de sons de impacto, pode ser exemplificado na Figura 4, onde destaca-se a importância de um material resiliente isolador e de amortecimento, onde são necessárias características físicas adequadas, como a rigidez dinâmica e elasticidade do isolador, além da densidade adequada do contrapiso.

Figura 4 - Modelo físico simplificado de um sistema de piso flutuante



Fonte: adaptado de Bistafa (2011).

2.3 O desempenho acústico de edificações

A avaliação de desempenho acústico de habitações compreende requisitos para adequar a edificação e suas respectivas partes a determinadas condições relacionadas ao conforto dos usuários. E define métodos para atingir níveis mínimos de conforto, considerando a utilização do espaço e do elemento construtivo. Mitidieri (1998) resumiu a metodologia para prática do conceito de desempenho no seguinte:

- a) Identificação dos critérios do usuário a serem atendidos, a exemplo as exigências de desempenho acústico;
- b) Reconhecimento das condições de exposição do edifício, seus elementos e componentes;
- c) Definição dos requisitos de desempenho que serão seguidos no edifício, seus elementos e componentes, expressos de forma qualitativa e quantitativa;

- d) Definição dos métodos de avaliação a serem utilizados para atingir os requisitos quantitativos previamente definidos.

Os requisitos de desempenho para edificações passaram por mudanças ao longo dos anos e até o início dos anos 2000 as normativas nacionais eram voltadas para especificação de componentes já conhecidos ou relacionadas a detalhes construtivos para sua utilização, sem preocupação em definir critérios de referência para qualidade mínima dos materiais antes de serem comercializados e dos ambientes (MITIDIERI, 1998; TAKAHASHI, 2016).

A partir deste período, foi formada a comissão de estudos e projetos da Norma Brasileira de Desempenho para Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos, a qual compilou diferentes pesquisas publicadas até o momento para redigir o texto-base da NBR 15575, hoje a norma vigente relacionada ao desempenho de construções (TAKAHASHI, 2016).

Segundo Gonçalves *et al.* (2003), a norma foi estruturada considerando a existência de classes distintas de edifícios (residencial, industrial, etc.); as exigências dos usuários; a possibilidade de avaliar o sistema construtivo completo e a facilidade de identificar os requisitos para os subsistemas; a compatibilidade com as normas já existentes para avaliação de desempenho de elementos; e a compatibilidade com o sistema normativo existente (métodos de cálculo, ensaios, etc.).

A concepção da NBR 15575 ocorreu em 2008 e as revisões de 2010, sua implantação em 2013 e a última revisão em 2021 aumentaram seu escopo e sua aplicação para edificações habitacionais. Esta normativa serve como base para a garantia da qualidade dos materiais do mercado da construção civil e norteia a melhoria das condições de uso e habitabilidade dos edifícios.

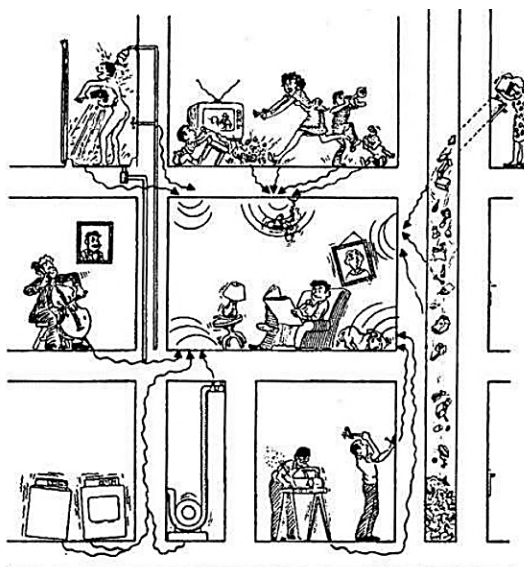
Requisitos de desempenho acústico em sistemas de pisos, conforme ressalta Pereira *et al.* (2014), têm motivado a indústria a desenvolver materiais e soluções que permitam a redução dos níveis de pressão sonora, que, em geral, são compostos de pavimentos flexíveis, pavimentos flutuantes e placas flutuantes.

2.3.1 Medição de isolamento acústico em edifícios e elementos de construção

A NBR 15575 (2021) define ruído de impacto como o som produzido pela percussão sobre um corpo sólido que é transmitido através do ar. As superfícies presentes na edificação (vedações verticais e sistema de piso) propagam esse ruído por vibração após a excitação localizada do impacto, sendo que a energia sonora pode ser difundida em uma ampla faixa de frequência (HOPKINS, 2012; PATRÍCIO, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O efeito de impacto pode gerar não só o ruído de forma isolada, na superfície de contato, mas sim ser amplificado quando esta superfície está conectada a outro elemento construtivo, como uma parede por exemplo, pela vibração causada na parede (MEHTA *et al.*, 1999). O ruído de impacto caracteriza-se por ser de curta duração e repetitivo, tendo como exemplo o caminhar de pessoas, a queda de objetos, o processo de bater um prego com um martelo, pessoas dançando e pulando, arrastar de moveis, entre outros (BISTAFA, 2011; MINERVINO, 2018). Na Figura 5 estão apresentadas algumas formas de ruído de impacto.

Figura 5- Fontes de ruído de impacto.



Fonte: Fahy (1987) apud Mivervino (2018).

Segundo Ferraz (2008) o ruído de impacto depende do objeto que causa o impacto e do sistema de piso. Caso o piso e o objeto de impacto tenham alta rigidez, ao contato o ruído gerado será significativo e de curta duração, predominando as

altas frequências. No entanto, quando o piso for composto por material resiliente, com alta flexibilidade e elasticidade, e o objeto também for resiliente ao impacto, o ruído será reduzido e sua duração será mais prolongada.

A velocidade de transmissão em meio sólido depende, então, do quão rígida são as ligações internas do material e explica por que a propagação do som é mais rápida em sólidos do que em líquidos ou gases (PAVANELLO, 2014). Losso e Viveiros (2004) compilaram dados de velocidade do som em diferentes materiais aplicados na construção civil relacionando-os com sua respectiva densidade (Tabela 3).

Tabela 3- Propriedades de diversos materiais utilizados na construção civil.

Material	Densidade (kg/m³)	Velocidade do som (m/s)
Chumbo	11300	1200
Aço	7700	5050
Alumínio	2700	5150
Concreto	2600	3100
Vidro	2300	5200
Tijolo	1800	3700
Borracha	1100	1450
Gesso	960	6800
Cortiça	240	500

Fonte: Adaptado de Losso e Viveiros (2004).

Rindel (2007) ressalta que há um desafio maior em especificar as características de sistemas de pisos em comparação com as vedações verticais, e que a variedade de revestimentos e composições dificultam o desenvolvimento de modelos preditivos confiáveis em relação a esse ruído e sua propagação.

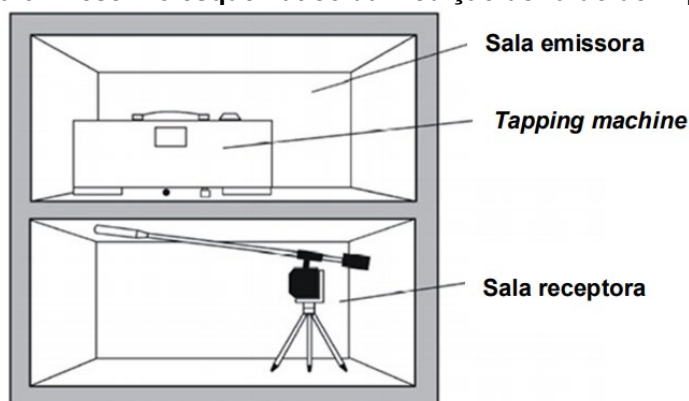
Na ISO 10140: *Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 3: Measurement of impact sound insulation* (2021) estão especificados métodos de medição de isolamento de ruído de impacto para pisos utilizando uma máquina de impacto padrão (*tapping machine*), obtendo o nível de pressão sonora no ambiente. A redução do som do impacto é então calculada através da diferença entre os níveis de pressão sonora obtidos com e sem a solução testada. Destaca-se que com as curvas obtidas, é possível obter a redução do som de impacto ponderado seguindo o procedimento definido no padrão ISO 10140

(2021) “Acústica - Medição laboratorial de isolamento acústico de elementos de construção - Parte 3: Medição de isolamento acústico de impacto”.

O ruído de impacto deve ser gerado pela máquina em no mínimo quatro posições diferentes distribuídas de forma aleatória no piso do local ensaiado. A distância mínima da máquina em relação às paredes do local é de 0,5 m.

No pavimento inferior um microfone irá receptor o ruído gerado pela máquina padrão, ele deve ficar a 1,0 m do piso superior que está sendo excitado pelo ruído. As posições onde o microfone será posicionado devem ter pelo menos 0,7 m de distância entre si, e ele deve ficar a 0,5 m de qualquer parede do local. Um mínimo de quatro posições para o microfone deve ser realizado, distribuídas de forma uniforme no local de ensaio; quando o microfone for posicionado de forma fixa para captação o mínimo aumenta para seis posições. Na Figura 6 está disposto um esquema de posicionamento dos equipamentos para realização do ensaio.

Figura 6 - Desenho esquemático da medição de ruído de impacto.



Fonte: Adaptado de Takahashi (2016).

No geral, as normativas determinam que haja uma combinação de pelo menos quatro posições da máquina de ruído padrão com quatro posições do microfone para captar o som gerado para validar os resultados obtidos.

O ruído é gerado em diferentes frequências pela máquina padrão, descritas na normativa, e deve ser captado com pelo menos 6 segundos para frequências até 400 Hz e com no mínimo 4 segundos para frequências mais altas. No uso de um microfone móvel, o tempo de captação não deve ser menor do que 15 segundos, para evitar alterações nos resultados. Seguindo os procedimentos é possível obter dados de nível de pressão sonora de impacto padrão em campo, L'_{nT} , em decibels (dB), conforme a Equação 3.

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

L'_{nT} = Nível de pressão sonora de impacto padrão (dB)

L_i = Nível de pressão sonora do ruído de impacto (dB)

T = Tempo de reverberação do ambiente receptor (s)

T_0 = Tempo de reverberação de referência (s). Para moradias é igual a 0,5 s

Para medições em laboratório (L'_n), na sala receptora, por sua vez, deve ser normalizado de acordo com a ISO 10140 (2021) utilizando-se a Equação 4 para levar em conta as variáveis consideradas em ensaios acústicos para ambientes controlados de laboratório.

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

L'_n é o nível de pressão de impacto sonoro normalizado (dB).

L_i é o nível de pressão de impacto sonoro na sala receptora (dB), é o impacto medido experimentalmente através do analisador de frequências

$A = \frac{0,16 * V}{TR}$ onde: V= Volume da sala de recepção e TR = Tempo de Reverberação

A_0 é a área de referência (igual a 10m²).

Na acústica aplicada à construção civil, a faixa de frequências de grande importância para a análise do desempenho de edifícios está entre 100 Hz e 3150 Hz (NETO, 2009). Neste contexto, as frequências são classificadas como baixas, médias e altas respectivamente para os intervalos entre 100 Hz e 315 Hz, entre 315 Hz e 2000 Hz e acima de 2000 Hz (NETO, 2009; BISTAFA, 2011). No quesito recomendações sobre as frequências, a ISO 10140 (2021) recomenda que os testes sejam realizados com a presença de filtro em bandas de terço de oitava contendo pelo menos as seguintes frequências centrais, dadas em Hz - essas adotadas na pesquisa de campo: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150 (Hz).

Os resultados obtidos podem ser utilizados para comparação com os valores de desempenho acústico definidos pela normativa de desempenho (NBR 15575, 2021) previamente discutidos. Santos *et al.* (2020) destacam que, após a implementação da NBR 15575 (2021), é latente a necessidade das empresas e profissionais da construção civil em se adaptar aos seus parâmetros, buscando novas tecnologias e materiais para contribuir com o isolamento dos ruídos de impacto nos pisos das edificações.

2.3.2 NBR 15575 (2021) – Desempenho de edificações habitacionais

A versão atual da NBR 15575 (2021) estabelece requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos) e métodos de avaliação para que as edificações atendam ao exigido pelos usuários em complementação com as normas prescritivas. A normativa está dividida em seis partes, sendo:

Parte 1: Requisitos gerais;

Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;

Parte 3: Requisitos para os sistemas de piso;

Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE;

Parte 5: Requisitos para os sistemas de cobertura;

Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A parte 1 da NBR 15575 (2021) apresenta os requisitos e critérios de desempenho para edificações habitacionais como um todo, de forma completa, considerando as exigências do usuário em relação à segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Sendo que seus requisitos são complementares aos apresentados nas partes seguintes da normativa e devem ser mantidos ao longo da vida útil da edificação por meio de manutenção dos elementos.

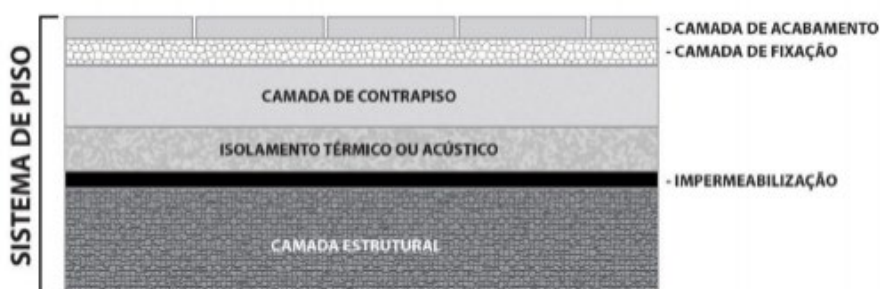
Para os critérios exigidos da edificação existem três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S); dos quais, o mínimo deve ser obrigatoriamente atendido como condição inicial para qualidade da edificação, e os níveis intermediário e superior são facultativos ao responsável técnico e utilizados para otimizar os parâmetros de desempenho de algum elemento específico ou de toda a edificação gerando um diferencial ao empreendimento.

Em relação ao desempenho acústico, a parte 1 da NBR 15575 (2021) estabelece na seção 12 que a edificação deve possuir isolamento acústico adequado: nas vedações externas para os ruídos aéreos provenientes do exterior do ambiente; entre as áreas comuns e privativas; e entre áreas privativas de unidades autônomas diferentes.

O isolamento de ruídos aéreos, em sistemas de pisos e vedações verticais deve ocorrer baseando-se nos requisitos e critérios estabelecidos nas partes 3 e 4 da NBR 15575 (2021) para realizar projeto, construção e montagem. Em conjunto, os sistemas devem dispor de isolamento acústico adequado para isolamento de ruídos por impacto baseado nos requisitos e critérios das partes 3 e 5 da NBR 15575 (2021).

Na parte 3 da NBR 15575 (2021) estão indicados os requisitos e critérios para desempenho em sistemas de piso, foco do presente trabalho. A versão atual da normativa abrange diretrizes para pisos internos e externos e define sistema de piso como conjunto de camadas destinado a cumprir a função de estrutura, vedação e tráfego (Figura 7).

Figura 7 - Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos.



Fonte: ABNT NBR 15575 (2021).

A seção 12 da NBR 15575 (2021) define as diretrizes para verificação do isolamento acústico do sistema de piso entre unidades autônomas, considerando o isolamento de ruído aéreo (conversas, som de TV, música, etc.) e isolamento de ruído de impacto (tráfego de pessoas, queda de objetos, etc.).

Os métodos para avaliação do desempenho acústico são realizados em campo e divididos entre de engenharia e simplificado. O método de engenharia é mais preciso e determina de forma rigorosa o isolamento sonoro de ruído aéreo ou ruído de impacto entre unidades autônomas e entre uma unidade e áreas comuns pelos procedimentos descritos na normativa ISO 10140 (2021). O método

simplificado é utilizado quando não há instrumentação necessária para medir o tempo de reverberação ou quando as condições de ruído no ambiente não possibilitam a obtenção dessa propriedade, ou seja, o método gera uma estimativa do isolamento sonoro tanto para ruído aéreo quanto para ruído por impacto em sistemas de piso.

O nível de desempenho mínimo para sistemas de piso referente a ruídos aéreos de uso normal (fala, TV, conversas, música) e uso eventual (áreas comuns e de uso coletivo) definidos pela NBR 15575 (2021) está apresentado na Tabela 4, sendo os valores expressos em diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,W}$) em decibels (dB).

Tabela 4 - Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,W}$

Elemento	$D_{nT,W}$ dB
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas em que um dos recintos seja dormitório	≥ 45
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos	≥ 40
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo, para atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	≥ 45

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

O anexo E da NBR 15575 (2021) complementa as recomendações de níveis de desempenho para ruído aéreo em sistemas de piso, considerando a classificação de desempenho mínimo, intermediário e superior (Tabela 5).

Tabela 5 - Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,W}$.

Elemento	$D_{nT,W}$ [dB]	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas em que um dos recintos seja dormitório	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥ 50	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo, para atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Para ruído de impacto (caminhamento, quedas de objeto, etc.) entre unidades autônomas os valores são expressos em nível de pressão sonora padrão ponderado, $L'_{nT,W}$, e devem ser obtidos com portas e janelas fechadas como foram entregues pela construtora ou incorporadora. Os valores mínimos determinados pela NBR 15575 (2021) estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado, $L'_{nT,W}$.

Elemento	$L'_{nT,W}$ dB
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	≤80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	≤55

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Na Tabela 7 estão apresentados os intervalos de nível de pressão sonora para os outros níveis de desempenho da edificação, complementando as informações anteriores (Tabela 6).

Tabela 7 - Critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado, $L'_{nT,W}$.

Elemento	$L'_{nT,W}$ [dB]	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	<i>M</i>
	56 a 65	<i>I</i>
	≤55	<i>S</i>
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	51 a 55	<i>M</i>
	46 a 50	<i>I</i>
	≤45	<i>S</i>

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15575 (2021).

Na normativa de desempenho (NBR 15575, 2021) ressalta-se que as demais classificações consideram a possibilidade de melhoria da qualidade da edificação como um todo, equilibrando a relação custo/benefício dos sistemas, e recomenda-se que o responsável técnico informe o nível de desempenho dos sistemas quando este exceder o mínimo proposto para a edificação.

A normativa de desempenho consiste um importante documento de referência na construção civil nacional e é instrumento essencial para exigir que os responsáveis técnicos conheçam o desempenho dos materiais e sistemas utilizados

hoje e futuramente, bem como saibam garantir a continuidade de um desempenho adequado ao longo do uso da edificação por parte dos usuários.

2.3.3 Redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_w)

A expressão analítica que determina a capacidade de isolamento acústica dos sistemas de piso é dada pela redução do nível sonoro normalizado de impacto (ΔL_n). Destaca-se que o ΔL_w é fundamental para realizar comparação entre os valores analíticos e os experimentais de desempenho acústico de uma estrutura. De acordo com BISTAFA (2011), de uma forma simplificada, 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 contrapiso e o assentamento do revestimento (L_n), e o nível sonoro medido na sala de recepção após a montagem do piso flutuante sobre a laje (L'_n), conforme exemplificado na Equação 5:

$$\Delta L_n = L_n - L'_n \quad \text{Equação 5}$$

Desta forma, o índice ΔL_w , de revestimentos elásticos e de contrapisos flutuantes pode ser obtido por certificados de laboratório, conforme preconiza a norma ISO 10140 (2021) e a EN 29052-1(1993) . Alternativamente, o índice pode também ser dado de acordo com a Equação 6:

$$\Delta L_w = 40 \log \frac{f}{f_1} \quad \text{Equação 6}$$

onde:

f = frequência da banda de oitava em análise, igual a 500 Hz.

f1 = frequência natural do sistema contrapiso-isolador-laje, em Hz.

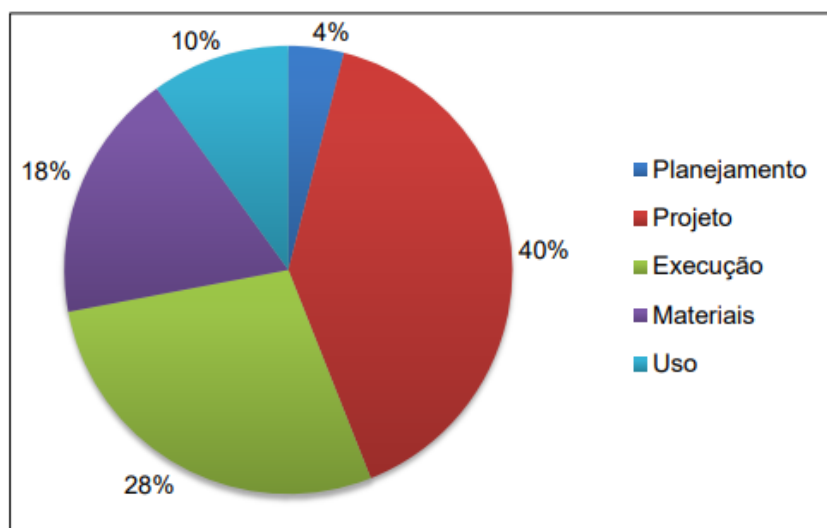
2.4 Materiais da construção civil

Os materiais de construção civil são componentes de diferentes naturezas, os quais exercem funções específicas e previsíveis para compor a existência de um ambiente ou elemento construído, projetado com uso determinado como habitação, transporte, serviços e outros. Podem ser provenientes de matérias-primas naturais e

artificiais, sendo que o conhecimento das suas propriedades pelo responsável técnico é fundamental para aplicação adequada dos mesmos e por abrir campo para a inovação tecnológica e criação de soluções para diversos desafios da construção civil (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006; BAUER, 2019).

É de responsabilidade dos profissionais responsáveis pelo empreendimento e suas etapas a escolha dos materiais a serem aplicados nos processos de execução; considerando sua finalidade, qualidade, atribuições técnicas e o equilíbrio entre custo e benefício. Dados de Helene (2003) apontam que grande parte dos problemas das edificações estão relacionados com especificação, escolha ou emprego inadequado dos materiais de construção civil (Figura 8). Esses teores evidenciam a necessidade de um amplo entendimento dos elementos construtivos e suas potencialidades para atender as necessidades do usuário, com desempenho adequado ao longo da vida útil da edificação.

Figura 8 - Origem das patologias relacionadas às etapas de concepção do edifício.



Fonte: Helene (2003) apud Zuchetti (2016).

Caiado (2014) apresenta critérios de especificação padrão a serem levados em consideração para escolha dos materiais de construção civil utilizados em determinada edificação:

- a) **Desempenho físico e químico do material:** deve-se analisar as condições externas as quais o material estará sujeito para adequar sua funcionalidade; tais como desgaste superficial por abrasão,

escorregamento, exposição a mudanças climáticas e de umidade, contato com componentes químicos, entre outros.

- b) Custos:** considerar os custos de compra do material, bem como os custos para seu transporte ao local da obra, armazenagem, instalação e futura manutenção (NETO, 2007).
- c) Estética:** fator a ser considerado especialmente em materiais utilizados na fase de acabamento, está relacionado não só com o aspecto visual mas também com o bem-estar do usuário e seu desejo para o ambiente construído.
- d) Confiança, tradição e familiaridade:** critério relacionado com a repetição na escolha dos materiais, pelo conhecimento prévio de suas especificações, facilidade de obtenção, entrega em volume, logística e aplicação (NETO, 2007).
- e) Normas técnicas específicas:** respeitar as diretrizes de uso e fabricação dos materiais que garantem um padrão mínimo de segurança e qualidade em relação a componentes básicos, medidas e informações ao consumidor. O Código de Defesa do Consumidor, Lei nº 8078 (1990), menciona o caráter obrigatório dessas especificações, regidas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).
- f) Conforto térmico e acústico:** outro fator relacionado ao bem-estar, visto que, segundo Cavalcante (2011) o desconforto nos dois âmbitos é uma das reclamações mais constantes entre os usuários, principalmente em edificações residenciais.

Os materiais são classificados, de acordo com Callister (2000) em seis grupos com relevância para o âmbito da engenharia: metais, cerâmicos, polímeros, compósitos, semicondutores e biomateriais. As características básicas de cada classe estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação e características dos materiais.

Classificação dos materiais	Características básicas
Metais	Aparência lustrosa, bons condutores de eletricidade e calor, alta resistência mecânica e deformabilidade
Cerâmicos	Isolantes à passagem de eletricidade e calor, resistentes à alta temperatura e ambientes abrasivos, duros porém muito quebradiços
Polímeros	Materiais comuns de plástico e borracha, baixa densidade e extremamente flexíveis
Compósitos	Materiais recentes consistindo da junção de mais de um material com finalidade de combinar as suas melhores características
Semicondutores	Propriedades elétricas intermediárias, sensibilidade a minúsculas concentrações de impurezas, presentes em produtos eletrônicos e computadores
Biomateriais	Empregados em implantes no corpo humano, não devem produzir substâncias tóxicas e devem ser compatíveis com o tecido humano

Fonte: Adaptado de Callister (2000).

Em relação aos materiais de construção civil, eles podem ser simples ou compostos e consistem em todo material aplicado à infraestrutura da edificação. Segundo os critérios de Silva (1985) as principais classificações dos materiais são quanto a sua origem e a sua função.

Quanto à sua origem, ou seja, o modo de obtenção dos materiais temos (SILVA, 1985):

- I) **Naturais:** encontrados na natureza no formato em que são utilizados, sendo realizado no máximo um processo de lavagem ou redução de tamanho de grãos. Exemplo: areia, rochas, madeira;
- II) **Artificiais:** obtidos por meio de processos industriais. Exemplo: tijolos, telhas, aço;
- III) **Combinados:** obtidos pela junção entre materiais naturais e artificiais. Exemplo: concretos e argamassas.

Quanto à sua função ou aplicação, a classificação consiste em (SILVA, 1985):

- IV) Materiais de vedação:** empregados para isolar os ambientes, sem função estrutural. Exemplo: tijolos de vedação e vidros;
- V) Materiais de proteção:** aplicados para proteger e aumentar a durabilidade dos elementos e da própria edificação. Exemplo: tintas e produtos impermeabilizantes;
- VI) Materiais com função estrutural:** elementos que suportam as cargas atuantes na estrutura. Exemplo: madeira, aço e concreto.

Embora sejam utilizados há muitos anos mantendo a sua estrutura e função básicas, a evolução desses materiais é constante com o objetivo de facilitar seu uso ou criar novas composições de materiais. Na sequência, são detalhados alguns dos materiais de construção civil mais difundidos e suas respectivas propriedades.

2.4.1 Metais

Os metais são empregados em diversos formatos na construção civil, se conceitualizam como substâncias simples que podem se combinar, formando as ligas, e tem como característica o brilho típico, opacidade, boa condução térmica e elétrica, dureza e forjabilidade (PINHEIRO; CRIVELARO, 2016; BAUER, 2019).

São provenientes de fontes não renováveis, porém são materiais duráveis e com possibilidade de reciclagem. Entre os metais mais utilizados na construção civil estão o cobre, o chumbo, o alumínio, o ferro e o aço.

O cobre e o chumbo são extraídos de diferentes minérios por calcinação e fusão e por fundição redutora, respectivamente. São empregados como tubulações para água quente, condutores elétricos e na fabricação de tintas, sendo que o chumbo possui alto grau de toxicidade ao ser humano e a natureza (OLIVEIRA, 2009; BAUER, 2019).

O alumínio é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, o minério explorado para sua extração por eletrólise é a bauxita e o Brasil é o sexto maior produtor de alumínio primário. Pode ser utilizado em perfis dobrados ou

chapas metálicas e aparece em esquadrias, telhas, calhas e estruturas mais leves (OLIVEIRA, 2009; PINHEIRO; CRIVELARO, 2016; BAUER, 2019).

O ferro é o metal com a maior quantidade de aplicação na construção civil, é obtido através do minério de ferro e a sua oxidação reduz a vida útil do material e exige uma maior manutenção. Seu uso ocorre em estruturas, esquadrias, grades, condutores, fechaduras e elementos de ligação (OLIVEIRA, 2009; BAUER, 2019).

O aço consiste em uma liga metálica composta principalmente de ferro e carbono. Devido às suas características como elevado módulo de resistência esse material permite vencer grandes vãos com seções relativamente pequenas e leves. Sendo assim, sua principal aplicação é estrutural e em combinação com o concreto, resultando no concreto armado, aparecendo em blocos de fundação, placas de coberturas e lajes, barras e perfis dobrados para vigas e pilares (OLIVEIRA, 2009; BAUER, 2019).

O maior desafio da utilização dos metais está relacionado ao processo corrosivo, quando expostos a ambientes agressivos, que pode alterar o aspecto exterior; influenciar na sua segurança estrutural, reduzindo a seção resistente; causar distorções ou fissurações e até rupturas imprevistas (BERTOLINI, 2010).

2.4.2 Madeira

A madeira pode ser utilizada de forma natural ou como matéria-prima industrial, possui baixa toxicidade, baixo consumo de energia no seu processamento e há possibilidade de renovação do material (OLIVEIRA, 2009; ZENID, 2013; BAUER, 2019).

As suas propriedades como alta resistência específica, boas características de isolamento térmico e elétrico, e a facilidade de trabalhar manualmente ou por máquinas; fazem com que este material tenha amplo emprego em detrimento de outros materiais da construção civil (ZENID, 2013).

Na construção civil, a madeira compõe tanto elementos provisórios, como em formas e cimbramentos, quanto elementos permanentes, como em estruturas de cobertura, pilares e vigas, vedação vertical, forros e pisos (OLIVEIRA, 2009; DIMAURO, 2011).

De acordo com Ferreira (2003), as formas mais comuns de se encontrar a madeira em edificações são:

- a) **Madeira roliça:** Possui menor grau de processamento e resíduo. Utilizada para estrutura e fechamento de paredes;
- b) **Madeira serrada:** Possui um grau maior de processamento e resíduo, há maior uso de energia para sua produção. Utilizada em seções quadradas ou retangulares para compor vigas, pilares, tábuas, caibros, forros e pisos;
- c) **Madeira laminada colada:** Constituída pela colagem de tábuas de madeira longitudinalmente. Possibilita a cobertura de grandes vãos então seu uso comum é como elemento estrutural;
- d) **Painéis:** Material é transformado em lâminas ou fibras, podendo ser utilizado resíduo da indústria, e estas são aglutinadas por material ligante. Permitem um uso mais eficiente da madeira, com maior aproveitamento, menor peso e custo. Comercialmente os painéis encontrados são os compensados, aglomerados, MDF (*Medium Density Fiberboard* – Placas de fibras de média densidade) e OSB (*Oriented Strand Board* – Placas de fibras orientadas).

Zenid (2013) aponta que no Brasil a madeira serrada é o principal produto de madeira utilizado na construção civil e que o maior desafio está relacionado com a qualidade das peças desse material. Pela madeira ser proveniente do crescimento de um ser vivo, as suas características variam em prol do ambiente de desenvolvimento, além da diversidade da própria espécie e aquelas geradas pelo seu processamento, armazenamento e eventual exposição.

2.4.3 Agregados

Os agregados são materiais particulados, incoesivos, de atividade química praticamente nula, compostos de misturas de grãos com diversos tamanhos. Constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos onde são

utilizados, como os concretos e argamassas, desempenhando um papel importante no custo total desses materiais (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006; BAUER, 2019).

Podem ser obtidos de forma natural, em leitos de rios ou barrancos, a exemplo temos as areias e pedregulhos; ou por processos artificiais, como a fragmentação de materiais extraídos, a exemplo temos as areias e britas artificiais (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006). A principal classificação dos agregados está relacionada o tamanho de grãos. A NBR 7211 (2009) os divide em:

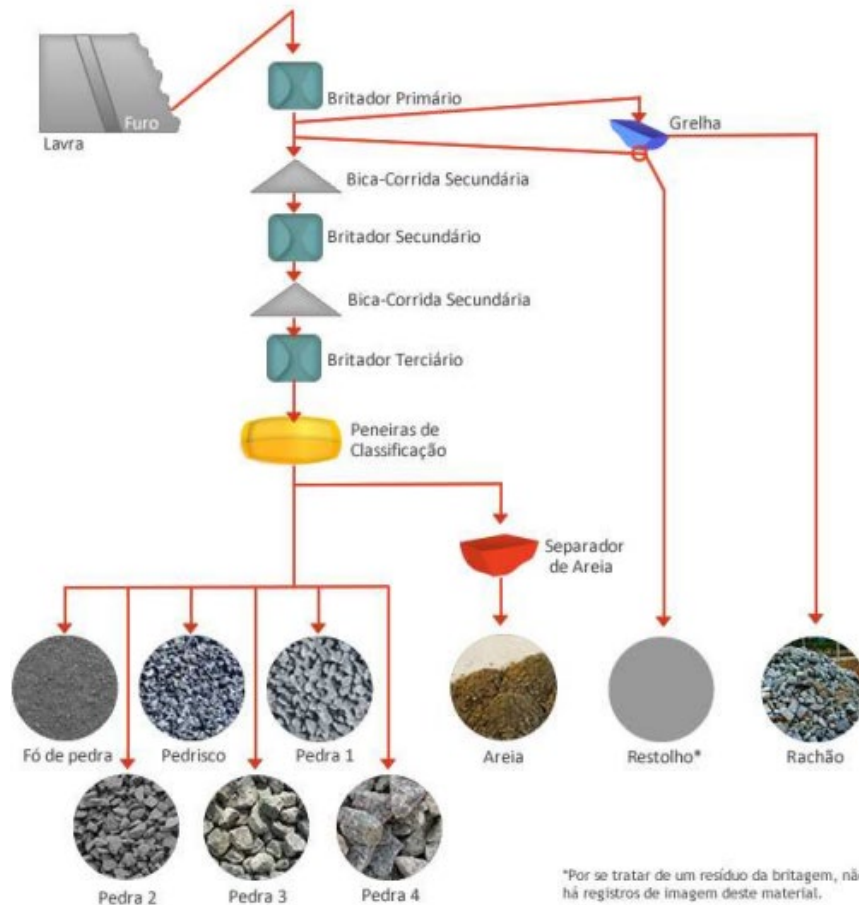
- a) **Agregados graúdos:** materiais cujos grãos passam pela peneira de malha 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm.
- b) **Agregados miúdos:** materiais cujos grãos, em sua maioria, passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de malha 150 µm.

Quanto as suas propriedades, os agregados são classificados de acordo com sua massa específica aparente em leves, normais ou pesados; ou de acordo com sua composição mineralógica, resultando da decomposição de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

No âmbito da construção civil, os agregados miúdos e graúdos são empregados em argamassas, concretos, lastro de estradas de ferro, misturas asfálticas, base de paralelepípedos, correção de solos, aterros, confecção de filtros para tratamentos de águas e efluentes, entre outros. São os materiais mais utilizados na construção de qualquer empreendimento e corresponde a quase todo o estoque presente no local da obra (HAGEMANN, 2011; BAUER, 2019).

O processo de obtenção dos agregados inicia pela extração de blocos retirados de jazidas minerais. O esquema geral do processo de britagem e da consequente produção dos diferentes tipos de agregados é apresentado na Figura 9.

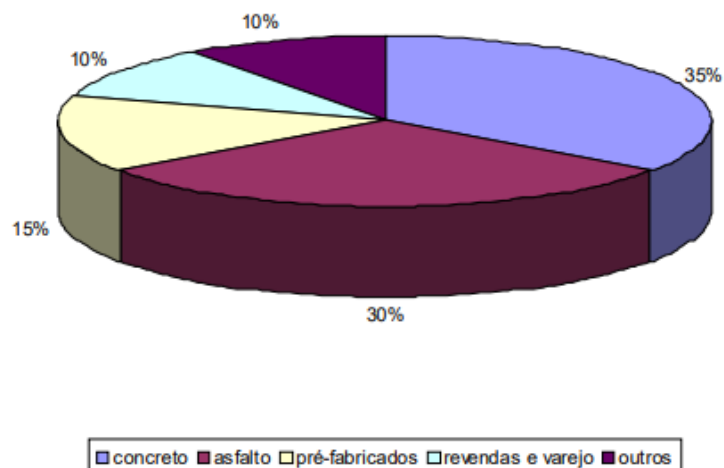
Figura 9 - Esquema geral do processo de britagem.



Fonte: Hagemann, 2011.

Ferreira e Fonseca Júnior (2012) apresentaram a distribuição no mercado consumidor de pedras britadas no Brasil, baseado em dados de 2010 (Figura 10).

Figura 10 - Segmentação do consumo de brita no Brasil.



Fonte: Adaptado de Ferreira e Fonseca Júnior (2012).

Agregados são bens de consumo de baixo valor econômico, considerados um bem praticamente inesgotável, mesmo não sendo um material não renovável. O ponto que influencia na comercialização desse material é o transporte, mesmo no Brasil que é rico em variedades e extensões geológicas, há carência de determinados tipos de agregados em algumas regiões (LA SERNA, RESENDE, 2011; BAUER, 2019). Essa escassez gera um aumento no custo de alguns agregados e resulta em utilização de materiais que não seriam totalmente adequados para determinada finalidade.

2.4.4 Materiais Cerâmicos

Bauer (2019) define cerâmica como pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e queima de argilas ou de misturas contendo argilas. As cerâmicas englobam, ainda, todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos após tratamento térmico em elevadas temperaturas.

Os materiais cerâmicos desenvolvem plasticidade quando água é adicionada à argila e, após a secagem ou cozimento, há o endurecimento do material mantendo a forma moldada. Apresentam como propriedades a alta estabilidade química, resistência à corrosão e ao calor (PINHEIRO; CRIVELARO, 2016; BAUER, 2019).

Na Tabela 9 estão apresentadas as denominações dos produtos produzidos a partir da argila e suas respectivas características.

Tabela 9 - Produtos produzidos a partir de argila comercializados na construção civil.

Produtos de argila comerciais	Características gerais
Materiais de argila secos ao ar	Resistência mecânica limitada e sensíveis ao meio, não é cerâmica, como o adobe
Cerâmica vermelha	Materiais cerâmicos de baixa vitrificação, como tijolos, blocos, telhas e tubos
Materiais cerâmicos de revestimento e acabamento	Materiais de alta vitrificação, como as placas cerâmicas e as louças sanitárias
Refratários	Cerâmicas naturais ou artificiais que retêm a forma física e a identidade química à altas temperaturas
Abrasivos	Produtos para uso industrial, como as lixas em rolos, discos em fibra e rebolos

Fonte: Adaptado de Bauer (2019).

Os produtos provenientes da argila e empregados na construção civil são amplos e com variadas finalidades. Dentre as funções estão os componentes para alvenaria de vedação e estrutural, componentes para cobertura (telhas e complementos), componentes para tubulação (tubos cerâmicos), produtos para revestimento (placas cerâmicas de parede interna/externa e de pisos), produtos de acabamento e utilitários (cerâmica branca ou louça utilizadas como cantoneiras, cabideiros, louças sanitárias e acessórios) e produtos especiais (BAUER, 2019). São materiais com abundância em matéria-prima, de fácil processamento e com características físicas e econômicas que justificam seu uso e consequente evolução tecnológica. As etapas de exploração e fabricação da cerâmica influenciam especificamente nas características e na qualidade dos materiais produzidos (BARBOSA; SANTOS; COSTA, 2016).

2.4.5 Aglomerantes

Ribeiro, Pinto e Starling (2006) definem aglomerantes como materiais pulverulentos que em presença de água se hidratam e formam uma pasta capaz de aglutinar ou fixar agregados, dando origem a outros materiais.

De acordo com o seu mecanismo de endurecimento, os aglomerantes são classificados conforme o descrito por Petrucci (1975) e Silva (1985):

Aglomerantes inertes: o processo de endurecimento ocorre devido à secagem do material, como é o caso da argila.

Aglomerantes ativos: o processo de endurecimento ocorre por meio de reações químicas. Essa categoria é subdividida em:

- a) Aglomerantes aéreos: aqueles que conservam suas propriedades e processam seu endurecimento na presença de ar, a exemplo temos o gesso e a cal.
- b) Aglomerantes hidráulicos: seu processo de endurecimento ocorre sob influência da água, mas conservam suas propriedades em presença de ar e água, é o caso do cimento Portland.

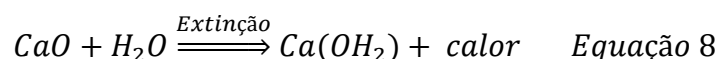
O gesso é obtido por meio da calcinação da gipsita natural em temperaturas da ordem de 140 °C, conforme a Equação 7. A homogeneidade no processo de calcinação é essencial para haver regularidade nas propriedades do gesso produzido (HAGEMANN, 2011; BAUER, 2019).



Ao entrar em contato com água o gesso torna-se plástico e endurece rapidamente, com tempo de pega entre 15 e 20 minutos, retornando a sua composição original. As características que o tornam esse material viável à utilização na construção civil são a elevada plasticidade da pasta, endurecimento rápido, elevada finura, reduzida retração após secagem e estabilidade volumétrica (OLIVEIRA, 2008; BAUER, 2019).

Sua aplicação se dá principalmente como material de acabamento no interior dos ambientes, obtendo superfícies lisas que substituem a massa corrida. Atualmente, seu amplo emprego é realizado em formato de placas, compondo o chamado *drywall*. As placas realizam a vedação em forros, divisórias e paredes de alvenaria e otimizam o desempenho térmico e acústico dos ambientes onde são instaladas (HAGEMANN, 2011).

A cal é o aglomerante obtido pela calcinação de rochas carbonáticas, sendo que o produto da queima é a cal viva ou virgem (CaO). Ela é utilizada como aglomerante após o processo de hidratação para obtenção da cal extinta ou hidratada, essa formação é apresentada na Equação 8 e libera uma quantidade significativa de calor.



Na construção civil, a cal é normalmente aplicada em argamassas de assentamento e revestimento, em pinturas, em misturas asfálticas, para estabilização de solos, para fabricação de blocos sílico-calcários e na indústria metalúrgica. Sua inserção propicia uma melhor trabalhabilidade nas misturas, aumenta a retenção de água, reduz a retração da pasta e ainda confere propriedades fungicidas e bactericidas ao material. Além do exposto, o custo

reduzido desse aglomerante o torna viável e atrativo para uso no ambiente construtivo (HAGEMANN, 2011).

Por fim, o aglomerante mais utilizado no setor construtivo é o cimento. Ribeiro, Pinto e Starling (2006) definem cimento como um pó fino constituído de silicatos e aluminatos de cálcio que possui inúmeras propriedades, dentre elas destacam-se a moldabilidade quando misturado com água e a capacidade de desenvolver resistência ao longo do tempo.

Sua fabricação é o resultado da moagem do clínquer, produto da calcinação de uma mistura de calcário e argila composto por silicatos hidráulicos de cálcio, ao qual uma parcela de gesso é adicionada para evitar pega instantânea do material (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006; HAGEMANN, 2011). Segundo Bauer (2019), os constituintes principais do cimento, somando de 95 a 96% da composição, são:

- a) Cal (CaO);
- b) Sílica (SiO₂);
- c) Alumina (Al₂O₃);
- d) Óxido de ferro (Fe₂O₃);
- e) Magnésia (MgO) – em proporção máxima de 5%;
- f) Impurezas.

Sua aplicação compreende a composição das diferentes argamassas (assentamento, colante e de revestimento), camadas de revestimento asfáltico e todos os elementos estruturais. A resistência mecânica do material é a característica principal a ser considerada em seu difundido uso, além da alta durabilidade e possibilidade de junção com outros materiais para melhorar propriedades específicas, como é caso da formação do concreto armado (concreto em combinação com o aço).

A variação na composição do cimento influencia nas suas características tanto no momento da mistura quanto após o endurecimento. A variedade de tipos de cimento especificados na Tabela 10 com dados provenientes da NBR 16697 (2018) demonstra a potencialidade desse material em relação a composição e evolução tecnológica.

Tabela 10 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de Resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem Adição	CP I	25, 32 ou 40 (c)	Rs (a) ou BC (b)
	Com adição	CPI-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI (d)	
Cimento Portland branca	EPCI	CPB	25, 32 ou 40 (c)	
	Não Estrutural	CPB	-	-

a) O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland;

b) O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland;

c) As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215;

d) Cimento Portland de alta resistência inicial, CPV, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: adaptado da NBR 16697 (2018).

Sua aplicação compreende a composição das diferentes argamassas (assentamento, colante e de revestimento), camadas de revestimento asfáltico e todos os elementos estruturais. A resistência mecânica do material é a característica principal a ser considerada em seu difundido uso, além da alta durabilidade e possibilidade de junção com outros materiais para melhorar propriedades específicas, como é caso da formação do concreto armado (concreto em combinação com o aço).

Como visto, os materiais de construção são originados de matérias-primas naturais e artificiais, sua extração e processamento modifica o meio local e resulta em gastos energéticos consideráveis com emissão de gases poluentes (BAUER, 2019). Nas últimas décadas a preocupação com a finitude de recursos e com os impactos prejudiciais ao meio vem crescendo e movimentado diferentes setores, inclusive o da construção civil.

Segundo Agopyan e John (2011), um dos desafios da área é desmaterializar a construção, reduzindo a quantidade de resíduos produzidos e os impactos ambientais negativos gerados. Uma das formas de enfrentar esse desafio é através da reutilização de materiais de construção que seriam descartados, os resíduos de obra, atribuindo a eles uma nova função na cadeia construtiva. A definição dos

resíduos de construção, bem como sua classificação e possibilidades de aplicação serão descritos na sequência do presente trabalho (item 2.4).

2.5 Resíduos de construção e demolição

De acordo com a Resolução do CONAMA (2002) n° 307, art. 2° Inciso I, são denominados resíduos sólidos da construção civil, os materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resultantes da preparação e da escavação de terrenos, onde pode-se exemplificar: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., muitas vezes denominados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A geração de resíduos de construção pode estar ligada a muitas causas, como decisões de projeto, de planejamento de construção, e de problemas de execução. Na fase de projeto, a forma de concepção, a falta de parâmetros sustentáveis, mudanças imprevistas no projeto, detalhes insuficientes e falhas na especificação do produto, são consideradas causas significativas de desperdício de materiais e de grande geração de resíduos (MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017).

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são definidos como todo e qualquer material proveniente de atividades de construção, reparos, reformas e demolições que envolvam estruturas, obras de arte, estradas e limpeza de terrenos com presença de solos e vegetação (WILSON, 1996; SCHULTMANN; ZORDAN, 1997; EC, 2000; RENTZ, 2000; FERRAZ *et al.*, 2001; LEITE, 2001; ANGULO, 2005). Sendo assim, esses resíduos compreendem uma alta gama de materiais como: diferentes tipos de plástico, papel, resíduos betuminosos, madeiras, materiais metálicos, concretos, argamassas, materiais cerâmicos como os tijolos e telhas, solos, gesso, entre outros (ANGULO, 2005).

Duan, Wang e Huang (2015) e Menegaki e Damigos (2018) apontam que a quantidade e a composição dos volumes de Resíduos de Construção e Demolição variam conforme a região onde estão sendo produzidos e dependem de fatores como o crescimento populacional, legislação, planejamento regional e a tecnologia da indústria da construção no local. A qualidade dos resíduos é influenciada tanto

por fatores internos (idade, classe, materiais de construção, tecnologias utilizadas na construção) quanto externos (tecnologias utilizadas na demolição, capacidade de gestão do RCD pelos responsáveis técnicos, crescimento populacional).

A indústria da Construção Civil é parte fundamental da economia da maioria dos países e contribui significativamente para a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e regional. No entanto, a geração de resíduos por parte desse setor é considerada uma das maiores parcelas do mundo, chegando a cerca de 10 bilhões de toneladas por ano (KLEPA *et al.*, 2019; MARQUES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

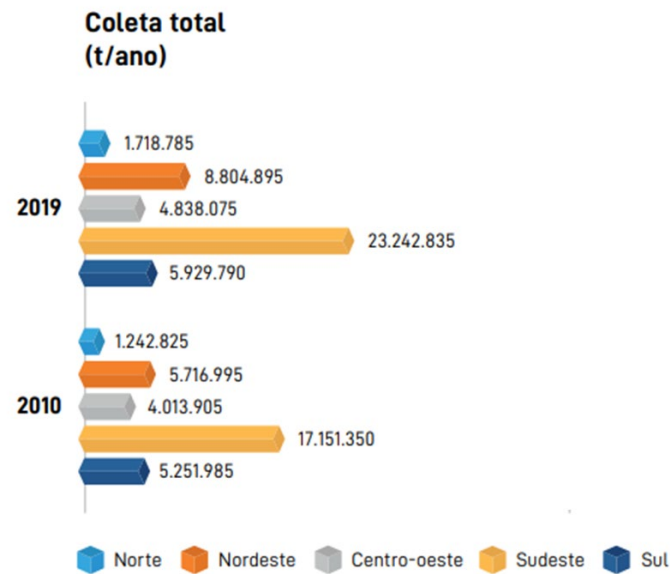
Atualmente, a China gera a maior quantidade de Resíduos de Construção e Demolição, com números entre 2 e 3 bilhões de toneladas/ano (WANG *et al.*, 2019). O continente Europeu gera em torno de 850 milhões de toneladas/ano de RCDs (SÁEZ; OSMANI, 2019) e, segundo Lu *et al.* (2017), a indústria da Construção Civil é responsável por cerca de 32% dos resíduos dispostos em aterros no Reino Unido.

Em relação ao continente americano, é estimado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos que o país gera em torno de 170 milhões de toneladas por ano de resíduos relacionados a construção e demolição (SILVA; BRITO; DHIR, 2017). No Brasil, foram gerados 45 milhões de toneladas de RCDs no ano de 2015, sendo que esse volume correspondeu a 57% do total de resíduos sólidos produzidos no país no mesmo ano (ABRELPE, 2016; MARQUES *et al.*, 2020).

A estimativa de geração de Resíduos de Construção e Demolição para o Brasil é de cerca de 100 milhões de toneladas por ano, onde são englobados tanto os resíduos que possuem direcionamento e descarte adequado, seguindo as respectivas legislações, quanto aqueles descartados de forma incorreta, prática ainda comum no setor nacional de construção (SILVA *et al.*, 2020).

Entre os anos de 2010 e 2019, a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020) indicou um crescimento no volume de RCDs coletados nos municípios de 33 milhões de toneladas, em 2010, para 44,5 milhões de toneladas, em 2019. Na Figura 11, esse aumento entre os anos analisados é apresentado dividido pelas regiões do Brasil. Ressalta-se que a região com a maior geração é a região Sudeste e a região Sul aparece em terceiro, atrás da região Nordeste.

Figura 11 - Coleta de RCD pelos municípios nas regiões.

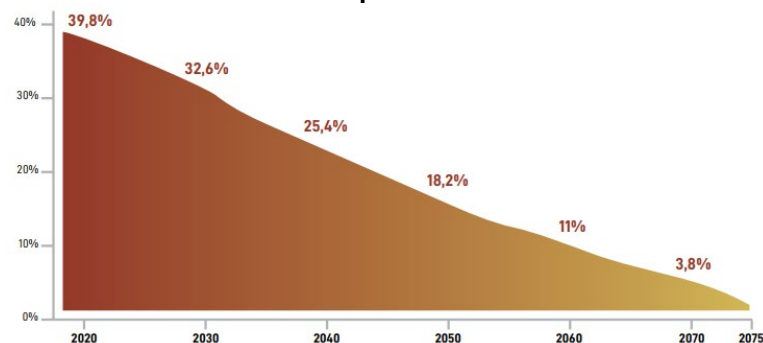


Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

O desafio principal em relação aos resíduos gerados no Brasil é referente a sua destinação e descarte. Apesar da instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos por meio da Lei nº 12.305 (2010), que determinava um prazo de quatro anos para regularizar a disposição ambientalmente adequada dos rejeitos, a redução de disposição inadequada é pouco expressiva, cerca de 0,72% ao ano (ABRELPE, 2020). Destaca-se que uma destinação final ambientalmente adequada, conforme a Lei nº 12.305 (2010), é aquela distribuição ordenada de rejeitos em aterros, considerando as normas operacionais específicas de modo a evitar riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Segundo a ABRELPE (2020), se a redução continuar em 0,72% ao ano, serão necessários 55 anos para que a destinação inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) chegue ao fim no Brasil, evolução demonstrada na Figura 12.

Figura 12 - Evolução da situação na disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos no país.



Fonte: ABRELPE (2020).

Esse caminho a ser percorrido na destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos nacionais exemplifica a necessidade de políticas e estudos que apresentem soluções viáveis para que o panorama evolua em menos tempo e com a participação de um dos setores mais expressivos nessa parcela, o da construção civil. Segundo Pinto (1999) e Cabral *et al.* (2009), os Resíduos de Construção e Demolição representam em torno de 50% do total de Resíduos Sólidos Urbanos gerados nos municípios brasileiros.

Considerando o volume gerado, os RCDs podem ser até duas vezes maiores do que os RSUs e resultar em diversos impactos ambientais negativos como assoreamento de córregos e rios, entupimento de galerias e bueiros, degradação de áreas urbanas (Figura 13), proliferação de microrganismos e insetos que afetam a saúde pública, além de multas em razão da deposição irregular (GALIVAN; BERNOLD, 1994; BRITO, 1998; JOHN, 1998; PINTO, 1999; ANGULO, 2001).

Figura 13 - Deposição de Resíduos de Construção e Demolição em local inadequado na cidade de Curitiba (Paraná).



Fonte: Resende, 2019.

De acordo com Carvalho, Marques e Lanzinha (2021) a geração de RCD decorre de quatro fatores cotidianos do ambiente construtivo:

- a) Falta de gerenciamento do RCD no canteiro de obras;
- b) Mão de obra despreparada com relação ao gerenciamento de resíduos;
- c) Perdas e desperdícios de materiais devido a projetos mal otimizados;
- d) Métodos ineficazes e consumo excessivo de recursos naturais devido aos erros de dimensionamento e falta de planejamento dos projetos de edificações.

Em 2002 entrou em vigor a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 307, que definiu a responsabilidade de grandes geradores públicos e privados em desenvolver e implantar um plano de gestão dos Resíduos de Construção e Demolição, antes desse período não existiam políticas públicas com diretrizes específicas para os resíduos das atividades de construção (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009; BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Nesse mesmo período começaram a surgir políticas nacionais relacionadas aos RCDs em diferentes cidades, além da implantação de normativas técnicas com o intuito de estabelecer parâmetros de classificação, destinação e reutilização dos mesmos. As políticas e normativas relacionadas aos RCDs estão explicitadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Normas técnicas e publicações sobre o gerenciamento e reciclagem de RCD.

Norma ou Publicação	Nome ou Instituições Responsáveis
Programa Entulho Limpo (1ª etapa – Coleta Seletiva – DF)	Sinduscon, Ecoatidade e Universidade de Brasília
Programa Entulho Limpo – Resíduos de construção e demolição – PE	Sinduscon, Sebrae e Ademi
NBR 15113	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15114	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15115	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos
NBR 15116	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimento e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos
Gestão ambiental dos resíduos da construção civil – A experiência do Sinduscon – SP	Sinduscon, Informações e Técnicas e Obras Limpas
Cartilha de gerenciamento de resíduos sólidos para a construção civil – MG	Sinduscon, Senai e Sebrae
Gestão de resíduos na construção civil – SE	Sinduscon, Senai e Sebrae

Fonte: Adaptado de Careli (2008) e Miranda; Ângulo; Careli (2009).

A normativa NBR 10004 (2004) estabelece que os resíduos sólidos provenientes de construção são considerados inertes, classe IIB de acordo com a Tabela 12. Porém, pela sua variável composição, os resíduos podem conter

componentes nocivos ao ambiente e à saúde humana como tintas, óleos, materiais asfálticos, amianto, entre outros (ANGULO; JOHN, 2002).

Tabela 12 - Classificação de resíduos sólidos em função do nível de risco à população.

Classe	Definição	Características
I	Perigosos	Aqueles que apresentam periculosidade, em função das suas características físicas, químicas ou infectocontagiosas, apresentando risco à saúde pública e ao meio ambiente, se gerenciados de forma inadequada.
II	Não Perigosos	Aqueles que não apresentam periculosidade, em função das suas características físicas, químicas ou infectocontagiosas, apresentando risco à saúde pública e ao meio ambiente, se gerenciados de forma inadequada.
IIA	Não Inertes	Aqueles que possuem: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Incluem-se nessa classificação os resíduos orgânicos em geral, como, por exemplo, os restos de alimentos.
IIB	Inertes	Aqueles que não apresentarem periculosidade e nem propriedades de biodegradabilidade combustibilidade e solubilidade em água, inserindo-se, nesse grupo, os minerais e minérios, como areia, pedra e ferro.

Fonte: Adaptado de NBR 10004 (2004).

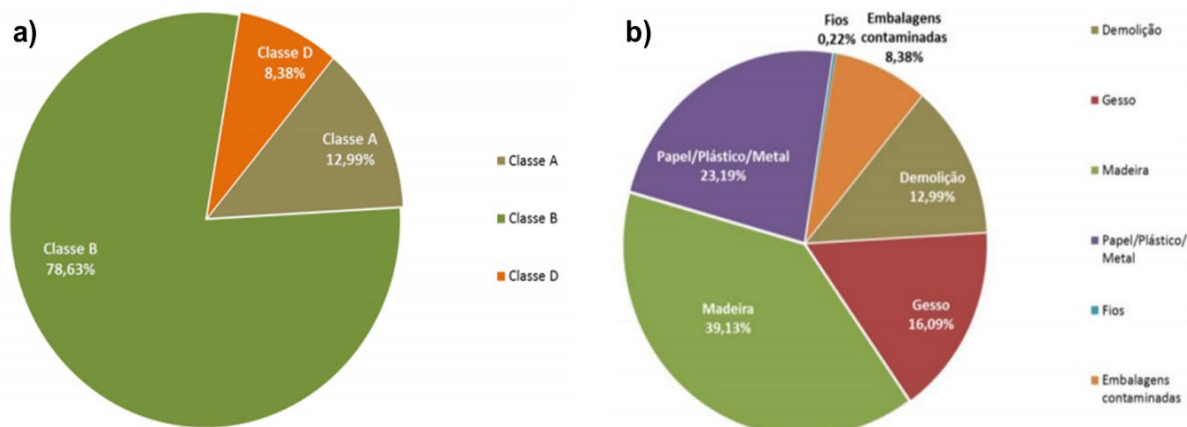
Nesse cenário de componentes variáveis, a NBR 15114 (2004) classifica os resíduos sólidos, em conformidade com a Resolução CONAMA n° 307 (2002), em quatro classes especificadas a seguir:

- a) Classe A - Resíduos reutilizáveis como agregados, como:**
- I. de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, incluindo os solos de terraplanagem;
 - II. de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, componentes cerâmicos, argamassa e concreto;
 - III. de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto produzidas em canteiro de obras.
- b) Classe B – Resíduos recicláveis para outras finalidades, como plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, gesso, entre outros.**

- c) **Classe C** – Resíduos para os quais não há tecnologia ou aplicações economicamente viáveis que possibilitem a sua reciclagem.
- d) **Classe D** – Resíduos nocivos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes, óleos; ou resíduos contaminados provenientes de demolição, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Caetano, Selbach e Gomes (2016) avaliaram a composição gravimétrica do RCD gerado nas etapas de acabamento em 90 unidades residenciais horizontais de padrão construtivo do programa habitacional “Minha Casa Minha Vida”. Na Figura 14 estão apresentados os resultados de volume de RCD divididos pelas classes da NBR 15114 (2004), bem como sua estratificação nos diferentes materiais de construção civil que compõe as referidas classes.

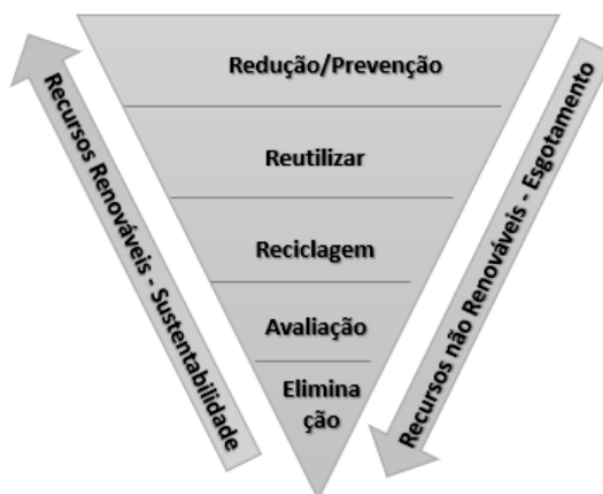
Figura 14 - a) Inventário quantitativo e b) Estratificação dos RCDs gerados nas unidades residenciais analisadas.



Fonte: Adaptado de Caetano, Selbach e Gomes (2016).

As normativas e programas de gerenciamento dos Resíduos de Construção e Demolição seguem um princípio hierárquico com o objetivo de reduzir o impacto negativo causado no meio ambiente (Figura 15). Esse princípio baseia-se em conceitos de sustentabilidade difundidos mundialmente (reduzir, reutilizar e reciclar) e viabiliza uma utilização racional dos materiais que seriam previamente descartados (CARVALHO; MARQUES; LANZINHA, 2021).

Figura 15 - Hierarquia de gerenciamento dos Resíduos de Construção e Demolição.



Fonte: Carvalho, Marques e Lanzinha (2021).

Dentre as fases de gerenciamento, destaca-se a reciclagem e a reutilização no que diz respeito aos resíduos de construção. Essas medidas vêm crescendo nas últimas décadas e são eficazes em reduzir a utilização de aterros, a ocorrência de disposições irregulares, o consumo de energia e recursos não-renováveis e os impactos ambientais produzidos por atividades de mineração (PINTO, 1999; EC, 2000).

Além do exposto, Islam *et al.* (2019) ressaltam que a reciclagem de RCDs tem potencial para extrair benefícios econômicos e ambientais desses materiais. A reincorporação de resíduos cerâmicos e de concreto contribuiu em torno de 45 milhões de dólares para a economia nacional em comparação com o uso de materiais convencionais. Algumas das pesquisas realizadas nos anos recentes com uso de Resíduos de Construção e Demolição serão detalhadas na sequência.

Xiao *et al.* (2018) substituíram parte do cimento por pó reciclado, proveniente de Resíduos de Construção e Demolição, em concretos e analisaram suas propriedades mecânicas e a fissuração nas primeiras idades. Os resultados indicaram que os concretos contendo o pó reciclado tiveram uma maior taxa de hidratação em comparação com as misturas sem o material. As propriedades mecânicas mantiveram-se estáveis com uma substituição de até 30%. A presença do pó reciclado afetou a trabalhabilidade e aumentou a fissuração em primeiras idades, sendo recomendado que medidas para minimizar a fissuração sejam

tomadas. Os autores indicam que a substituição do cimento pelo pó reciclado fique entre a faixa de 15% e 30% para um melhor desempenho das misturas.

Sena, Amorim e Ingunza (2019) avaliaram a viabilidade técnica de misturas de concreto asfáltico pré-misturadas a frio compostas com agregados de RCD. Pelas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) os autores identificaram que a aplicação de RCD melhorou a estabilidade e a aderência superficial do concreto asfáltico. Em relação aos parâmetros volumétricos da metodologia Marshall, o concreto contendo os agregados de RCD apresentou desempenho inferior ao concreto com agregados naturais, contudo os parâmetros obtidos são aceitáveis para aplicação da mistura segundo o método. Foi constatado que o uso de RCD na composição de concretos asfálticos a frio, em pavimentos de baixo tráfego, tem expressivo potencial tanto econômico quanto ambiental.

Ibrahim *et al.* (2020) exploraram a produção de concretos permeáveis contendo agregados finos reciclados (RFA) de concreto. A porcentagem de resíduos testada pelos autores foi de 72% em volume do total de componentes do concreto. A incorporação dos resíduos gerou melhora nas propriedades mecânicas do concreto, 7% na resistência à compressão e 37% na resistência à ruptura, respectivamente. Em decorrência do aumento da resistência e de uma argamassa mais aderida pela presença do material fino, o concreto permeável analisado apresentou redução na capacidade de desvio de fissuras em comparação com concretos sem o material fino reciclado.

Yang, Liu e Ma (2020) utilizaram resíduos de tijolos cerâmicos como material cimentício suplementar para a composição de concreto celular. A incorporação do resíduo de tijolos reduziu a retração por secagem do concreto, mantendo uma boa taxa entre retração máxima e substituição. Até o teor de 15% de substituição a propriedade de resistência à compressão do concreto foi mantida. Pelos resultados alcançados, os autores concluíram que a utilização de resíduos de tijolos cerâmicos tem excelente eficiência em reciclagem, além de trazer benefícios ambientais e econômicos na confecção de concretos celulares.

Lima *et al.* (2021) confeccionaram misturas de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) com agregados de RCD nas frações de areia e brita 1. Os concretos asfálticos com material reciclado apresentaram menor densidade aparente, maior absorção e resistência ao desgaste próxima ao concreto asfáltico de comparação, ou seja, as misturas respeitaram os limites para aplicação em pavimentação. Pelos

resultados obtidos foi constatada a possibilidade de emprego das misturas de CAUQ com RCD e um trecho experimental na área urbana de Natal, no estado de Rio Grande do Norte, foi confeccionado.

Robalo *et al.* (2021) produziram concretos e coeficientes com Resíduos de Construção e Demolição que continham baixa taxa de cimento, as substituições em volume variaram entre 43 a 80%. As propriedades mecânicas dos concretos com RCD são altamente influenciadas pela composição dos agregados, pela taxa de substituição, pelo teor de material fino compondo o RCD e pela relação água/cimento que gera a pasta ligante da mistura. Apesar da variação, os autores demonstraram que é possível a confecção de concretos contendo baixa dosagem de cimento (até 175 kg/m^3) e com uma taxa de substituição significativa por RCD (até 60%) para uso com fins estruturais, apresentando boa trabalhabilidade e elevado desempenho em relação a eco eficiência proposta.

Em relação a melhoria no aspecto de desempenho acústico de materiais da construção civil, diferentes abordagens com utilização de resíduos vêm sendo testadas nos últimos anos.

Wang *et al* (2016) confeccionaram placas de cimento com resíduos de madeira de construção para analisar aspectos de resistência, peso e isolamento térmico/acústico. A proporção de madeira para cimento de 3:1 (em volume) garantiu uma estabilidade dimensional aceitável para as placas, com inchamento menor que 2%. Os autores atingiram condições de produção que atendem ao Padrão Internacional de resistência de 9 MPa, permitindo que o material seja utilizado como estrutura leve. Além disso, as placas confeccionadas apresentaram excelente redução do ruído proveniente da estrutura (entre 32 e 100 Hz) e baixa condutividade térmica ($0,29 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Portanto, as placas constituem uma solução de destinação para os resíduos de madeira de construção com viabilidade econômica e potencial para aplicação como material de isolamento térmico e acústico.

Tutikian *et al.* (2017) desenvolveram argamassas leves a partir da incorporação de resíduos de EVA (etileno acetato de vinila) resultantes da indústria calçadista, para utilização como contrapisos para isolamento acústico. As porcentagens testadas estavam entre 20 e 100% de substituição do agregado miúdo por EVA, sendo analisadas as propriedades de resistência e o nível de pressão sonora de impacto. A incorporação do EVA contribuiu para o isolamento do ruído do impacto em todas as porcentagens. O traço com 100% de substituição apresentou

otimização no isolamento acústico e resistência mecânica satisfatória em comparação com o contrapiso sem resíduos. A maior redução de ruído detectada chegou a 9 dB, o que confirmou o potencial do material com EVA para utilização como isolante acústico.

Rodriguez *et al.* (2019) analisaram diferentes tipos de agregados provenientes de Resíduos de Demolição para moldagem de concretos considerando o seu comportamento acústico e a estrutura de poros formada. O uso dos agregados de resíduos afetou as propriedades de densidade e porosidade dos concretos. Pelos resultados confirmou-se que os concretos com agregados de resíduos são eficazes na absorção sonora, especialmente quando não há compactação desses materiais. Por fim, os autores declaram que a alternativa de inserção dos RCDs no concreto com intuito de melhorar o desempenho acústico é válida e irá aumentar as taxas de reciclagem, evolução exigida pelas legislações atuais.

Em conclusão das pesquisas envolvendo desempenho acústico em combinação com a aplicação de resíduos, Amarilla *et al.* (2021) analisaram o coeficiente de absorção sonora dos ruídos de tráfegos rodoviários por blocos de concreto construídos com RCD. Os resultados mostraram que uma barreira acústica simples constituída dos blocos com RCD consegue reduzir o ruído externo analisado. Sendo assim, o uso dos blocos para construção de barreiras acústicas tem viabilidade como uma aplicação sustentável, mitigando o impacto sonoro e o ambiental. Como proposta final, os autores ressaltam que a tendência atual está em encontrar materiais sustentáveis, principalmente para o concreto, e que a reciclagem de resíduos gerados nos processos construtivos é um dos métodos de adentrar nessa tendência.

Mesmo com o crescimento de pesquisas relacionando os Resíduos de Construção e Demolição com o desempenho acústico do material, há ainda um longo caminho a ser explorado para que esta junção seja uma alternativa viável e difundida no setor da construção civil. A criação de materiais sustentáveis que prezem pelo conforto do usuário é latente e necessária para a evolução tanto dos materiais aplicados quanto dos empreendimentos como um todo.

2.6 Sustentabilidade

A discussão sobre sustentabilidade integra diversos setores da sociedade atual e é utilizada para trazer conscientização e mobilizar o desejo por uma sociedade mais humana, ciente da gravidade de problemas como o aquecimento global e o esgotamento de recursos naturais (MOTTA, 2009; BAUER, 2019).

Segundo Mikhailova (2004), no seu sentido lógico sustentabilidade consiste na capacidade de manter, de sustentar, ou seja, considerando a exploração de um recurso natural, se realizada de forma sustentável o recurso não irá se esgotar. Para alcançar a sustentabilidade é necessário pensar em um modelo abrangente e que englobe o equilíbrio entre as esferas social, econômica e ambiental.

Em meados dos anos 70, a preocupação com a exploração desenfreada dos recursos naturais e o aumento expressivo da população resultou nos primeiros encontros que trataram sobre parâmetros hoje relacionados a sustentabilidade, a publicação do documento *The limits of growth* (Os limites do crescimento) pelo Clube de Roma em 1968 e a *Conference on the Human Environment* (Conferência sobre o Meio Ambiente Humano) realizada pela ONU em Estocolmo no ano de 1972 (MOTTA, 2009).

O conceito de desenvolvimento sustentável apareceu pela primeira vez no Relatório Bruntland de 1987, tendo também o título de *Our common future* (Nosso futuro comum), publicado pela Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento (WCED) e consiste no desenvolvimento econômico e social que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a possibilidade das gerações futuras em atenderem as suas próprias necessidades (CSILLAG, 2007; MOTTA, 2009; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010).

Em 1992, foi realizada no Rio de Janeiro a segunda conferência ambiental proposta pela ONU, a Eco-92 ou Rio-92, e nesta foram apresentados planos de ações e metas com objetivo de mudar o comportamento da sociedade em relação ao meio ambiente, reduzir a diferença social e econômica entre os países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento e consolidar a execução de um desenvolvimento sustentável. Dessa conferência resultou o documento chamado Agenda 21, o qual definiu estratégias de exploração sustentável dos recursos sem que o desenvolvimento dos países seja comprometido. Além disso, a Agenda 21 enfatizou a importância do comprometimento dos países, em todos os seus setores,

em procurar e aplicar soluções sustentáveis nos seus campos de atuação (CSILLAG, 2007; CORRÊA, 2009; MOTTA, 2009).

Em 2002, a Declaração de Política da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, elaborada em Johannesburg, estabeleceu o conceito multidisciplinar que é aplicado atualmente, enunciando a construção sobre três pilares interdependentes e mutuamente sustentadores: desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental (JACOBI, 1999; CORRÊA, 2009).

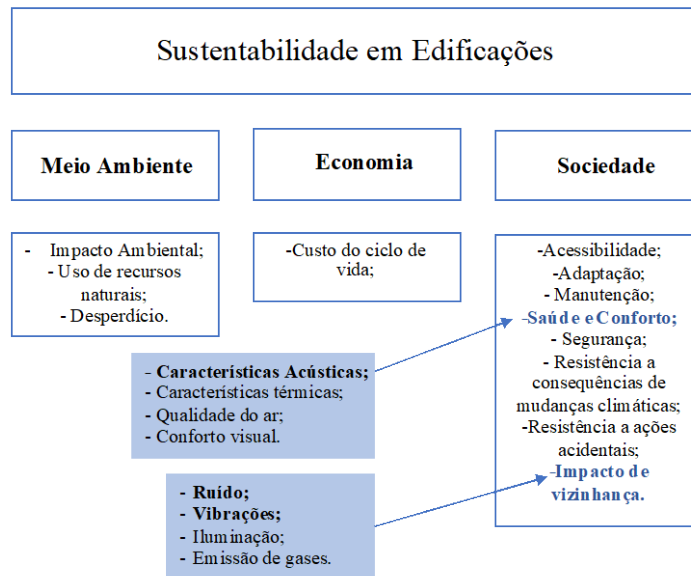
Analisando os pilares separadamente, o intuito do desenvolvimento econômico é a criação de empreendimentos e realização de serviços que sejam viáveis e ao mesmo tempo atrativos. Prevê ainda um desenvolvimento intersetorial equilibrado com modernização contínua dos instrumentos e processos através de pesquisas científicas e tecnológicas (SACHS, 1993; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

O desenvolvimento social preocupa-se com a equidade na distribuição de renda da população, melhorando seus direitos e condições. Além disso, foca na geração de empregos que garantam qualidade de vida e acesso aos recursos e serviços fundamentais a todo ser-humano, como educação, saúde e saneamento básico (SACHS, 1993).

A proteção ambiental visa a interação entre os processos com o meio ambiente sem a geração de danos permanentes ou irreversíveis. Promove ainda a limitação no consumo de combustíveis fósseis e outros recursos finitos ou nocivos, substituindo-os por recursos renováveis e inofensivos. Para isso, esse pilar baseia-se na redução da poluição e volume de resíduos gerados, estimula a reciclagem e a implantação de tecnologias limpas (SACHS, 1993; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

De acordo com a definição de sustentabilidade, conforme o contido na EN 16309:2014 - "Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação do desempenho social dos edifícios - Metodologia de cálculo", devem ser levados em consideração para projetar, analisar e avaliar edificações os aspectos e consequências ambientais, econômicos e sociais, também chamados de "Três Pilares da Sustentabilidade.", conforme exemplifica a Figura 16.

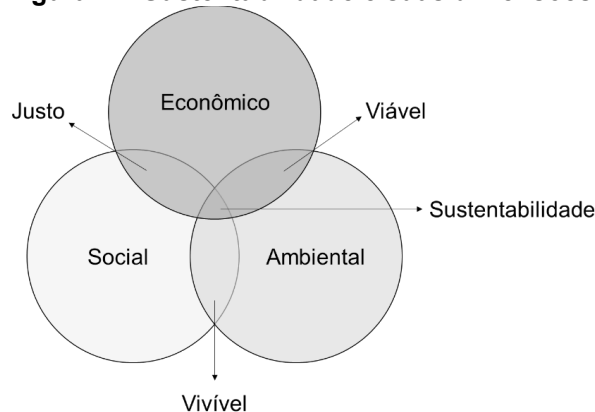
Figura 16 - Sustentabilidade em Edificações.



Fonte: adaptado de EN 16309 (2014), e de Dolezal e Glasl (2015).

Em conjunto os três pilares se interceptam formando os conceitos de viável, justo e vivível; e a união completa gera a construção da sustentabilidade (Figura 17).

Figura 17: Sustentabilidade e suas dimensões.



Fonte: Adaptado de Alledi Filho *et al.* (2003) e Oliveira *et al.* (2012).

Nos últimos anos outros pilares vêm sendo apontados como parte da construção da sustentabilidade, entre eles ressalta-se o pilar cultural que é apontado como aquele que engloba os outros três. A sustentabilidade cultural baseia-se na diversidade e identidade cultural, visa o equilíbrio entre tradição e inovação respeitando a história, memória e individualidade das comunidades (SACHS, 1993; JACOBI, 1999; LEAL FILHO; MANOLAS; PACE, 2015; CORRÊA; ASHLEY, 2018).

O setor da construção civil tem papel fundamental na evolução do desenvolvimento sustentável, hoje é apontado como o setor que mais consome recursos naturais e energia, gerando significativos impactos ambientais e grande volume de resíduos (AGOPYAN; JOHN, 2011; BAUER, 2019). O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2005) aponta que são necessários ajustes imediatos nas presentes práticas de produção e execução de obras.

Nesse contexto, desponta o conceito de Construção Sustentável, segundo o Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação em Construção (CIB, 2002), como sendo o processo holístico para reestabelecer a harmonia entre os ambientes natural e construído e criar empreendimentos que confirmem a dignidade humana e estimulem a igualdade econômica. A construção alcança a sustentabilidade quando os pilares econômico, social e ambiental são explorados ao longo da sua confecção e posterior utilização.

Araújo (2006) elenca vários parâmetros que comandam a construção sustentável e estão desenvolvidos na sequência:

- a) **Gestão da obra:** engloba a realização de estudo de impacto ambiental, análise do ciclo de vida dos materiais e da obra, e consumo de energia para manutenções e reformas;
- b) **Aproveitamento passivo dos recursos naturais:** utilização dos recursos disponíveis no ambiente de construção, como a iluminação natural e ajuste do cronograma para o clima local;
- c) **Qualidade do ar e do ambiente interior:** criação de um ambiente saudável, bem ventilado, não selado e isento de poluentes (como os compostos orgânicos voláteis – COVs);
- d) **Conforto térmico e acústico:** uso de tecnologias inteligentes para regular temperatura e som visando o bem-estar do usuário;
- e) **Eficiência energética:** promover a racionalização no uso de energia pública e aproveitar as energias renováveis, como a eólica e a solar;

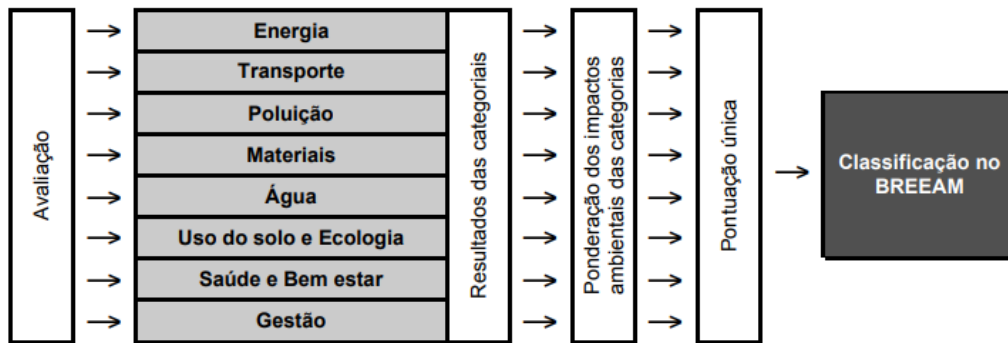
- f) **Economia de água:** implantação de tecnologias que possibilitem a redução no consumo de água, além de projetar sistemas de reuso e recirculação de água como o aproveitamento de água da chuva;
- g) **Gestão de resíduos:** desenvolver áreas de coleta seletiva dos resíduos bem como um projeto de destinação e reciclagem;
- h) **Redução de materiais nocivos:** eliminar ou reduzir ao máximo o uso de materiais com potencial contaminante para os indivíduos e para o meio ambiente, como o amianto, chumbo, alumínio, PVC, entre outros;
- i) **Uso de tecnologias sustentáveis:** emprego de materiais e tecnologias ecológicas em todas as etapas da obra.

Os parâmetros de desempenho sustentável são estruturados em sistemas de avaliação ambiental que permitem a identificação das edificações que adotaram práticas e princípios de sustentabilidade (GOULART, 2005; MOTTA, 2009). De acordo com Silva (2003), os sistemas de avaliação ambiental são um meio com alta eficiência no objetivo de evoluir o desenvolvimento sustentável das edificações.

O primeiro sistema de avaliação ambiental foi o BREEAM (*Building Establishment Environmental Assessment Method*), desenvolvido no Reino Unido em 1990. O sistema visa minimizar os impactos ambientais negativos dos empreendimentos já construídos e daqueles em fase de projeto. Para isso o BREEAM é estratificado em categorias de tipo de edificação e de acordo com a fase em que a edificação se encontra (CSILLAG, 2007; BRE, 2008; MOTTA, 2009).

A avaliação é realizada por meio de documentos e verificação de itens mínimos de desempenho, projeto e operação da edificação. Para classificar um empreendimento são designados avaliadores treinados pelo próprio BREEAM. Na Figura 18 estão apresentadas as categorias de avaliação e o processo completo para a classificação final. A pontuação de cada categoria é definida pela ponderação do impacto ambiental causado pela mesma no empreendimento analisado (BRE, 2008). Por atribuir uma classificação com pontuação esse sistema permite comparação entre os empreendimentos certificados.

Figura 18 - Processo de avaliação, ponderação e classificação do BREEAM.



Fonte: Adaptado de BRE, 2008.

Em 1994, nos Estados Unidos, foi criado o sistema LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) de avaliação, o qual é voluntário, de desempenho consensual e voltado para o mercado. Seus objetivos compreendem definir o edifício verde com um padrão único de pontuação, reconhecer a importância do meio ambiente no setor da construção civil, construir a consciência do edifício verde e transformar o mercado imobiliário, e certificar os edifícios que atingiram as metas estabelecidas com o selo LEED (CSILLAG, 2007; MOTTA, 2009; USGBC, 2010).

As áreas consideradas pelo sistema LEED estão demonstradas na Figura 19. Pela análise de cada categoria é definida uma pontuação para o empreendimento, podendo ser classificado como certificado, prata, ouro ou platina.

Figura 19 - Áreas de desempenho analisadas na certificação LEED.



Fonte: USGBC, 2010.

A certificação LEED é atualmente a mais difundida no meio construtivo, pois provê uma estrutura completa para otimizar o desempenho do edifício em relação a sustentabilidade. Pelo seu sistema de avaliação e classificação gradativa (Figura 20), permite a comparação entre edificações e possibilita a evolução contínua do empreendimento em todas as esferas sustentáveis.

Figura 20 - Selos de certificação LEED.



Fonte: USGBC, 2010.

Conforme demonstrado pelos princípios de construção sustentável e pelos parâmetros avaliados nas certificações ambientais apresentadas, a reutilização de materiais que seriam descartados, como os Resíduos de Construção e Demolição, e a atmosfera da qual o usuário irá desfrutar são partes importantes da concepção de sustentabilidade. Portanto, a junção da aplicação de RCDs com a melhoria do bem-estar do usuário no aspecto acústico apresenta-se como uma alternativa atualizada e viável para a evolução da construção civil rumo ao ideal de desempenho sustentável.

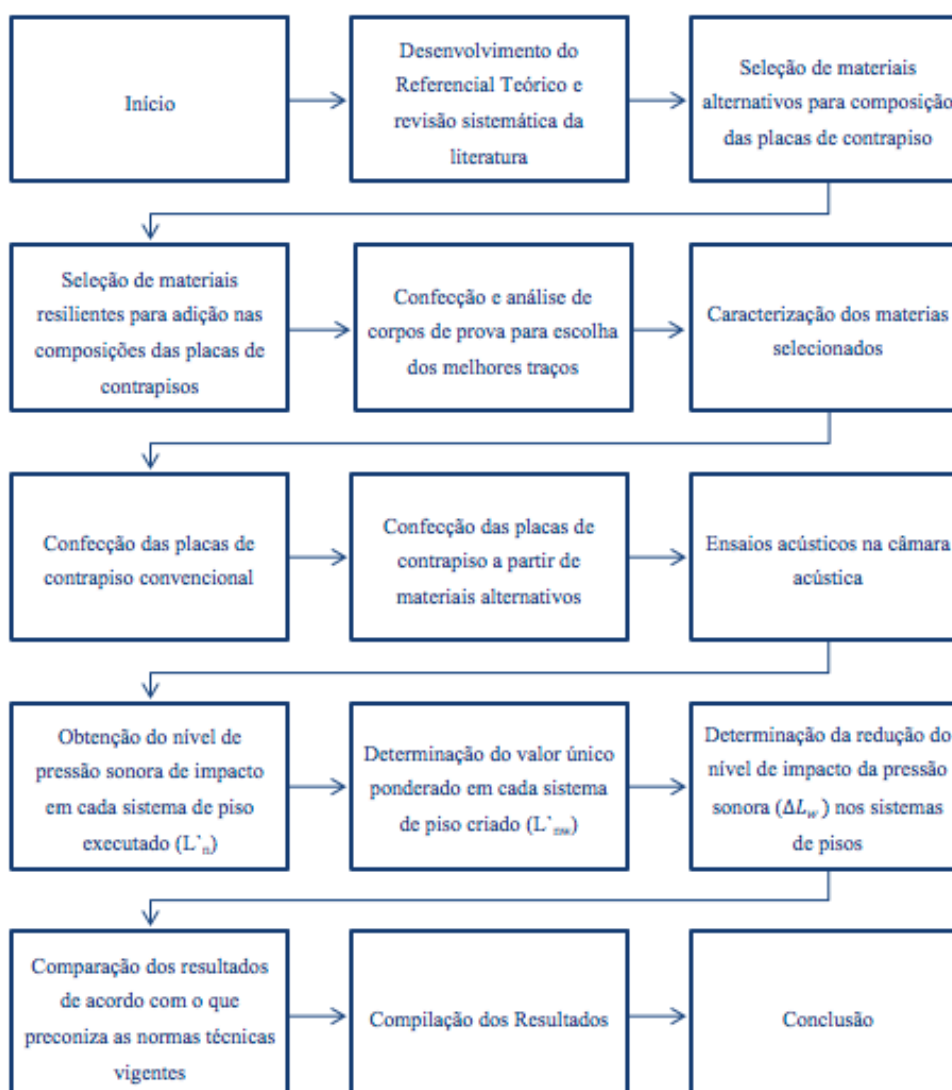
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados no presente trabalho e os métodos de caracterização e análise empregados nos mesmos.

O procedimento experimental foi selecionado com o objetivo de analisar o desempenho acústico de placas de contrapiso ao ruído de impacto em sistemas de piso constituídas com Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e com adição, separadamente, de diferentes materiais resilientes (raspas de borracha, argila e aditivo incorporador de ar).

Na Figura 21 está disposto o fluxograma que resume as etapas do presente trabalho, indicando a ordem de seleção e confecção das placas analisadas durante a pesquisa.

Figura 21 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: a autora (2022).

3.1 Classificação da pesquisa

Com relação a sua finalidade esta tese é classificada como pesquisa aplicada ou tecnológica, onde o objetivo é adquirir novos conhecimentos para o desenvolvimento ou aprimoramento de produtos, processos e sistemas, gerando conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos.

No que diz respeito aos seus objetivos, esta pesquisa pode ser classificada com pesquisa explicativa. De acordo com Lakatus e Marconi (2011), a pesquisa explicativa identifica fatores determinantes para a ocorrência dos fenômenos, e a partir da compilação dos resultados analisa as razões que levam o fenômeno a se desenvolver de determinada maneira. Essa prática visa definir leis mais amplas, estruturar e definir modelos teóricos, relacionar hipóteses em uma visão mais unitária do universo ou âmbito produtivo em geral e gerar hipóteses. Visa identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos ou variáveis que afetam o processo. Nas áreas tecnológicas, há a necessidade da utilização de métodos experimentais para que os fenômenos sejam identificados para posteriormente serem explicados. De acordo com Gil (2009), pode-se dizer que o conhecimento científico está assentado nos resultados oferecidos pelos estudos explicativos.

Do ponto de vista da sua natureza, esta tese classifica-se como quantitativa, onde se pretende adquirir conhecimentos para aplicação prática, por meio de interpretação dos resultados obtidos, e ainda utilizar indicadores numéricos para análises dos objetivos propostos, baseados em levantamentos de um número expressivo de dados. Com relação ao tempo considera-se longitudinal, tendo como fonte de dados o laboratório, onde se permite estabelecer o padrão desejável de observação, captar dados para descrição e análise e controlar o fenômeno e o processo de desenvolvimento.

O método de procedimento principal é classificado como experimental, onde foram analisados aspectos específicos de várias situações e suas decorrências, buscando explorar situações reais de desempenho acústico ao ruído de impacto em sistemas de pisos com materiais alternativos, a partir da busca de soluções por meio de uma pesquisa aplicada.

3.2 Caracterização de materiais

O aglomerante utilizado para a dosagem das argamassas de contrapiso foi o cimento CPV-ARI (alta resistência inicial), da empresa Supremo Secil Cimentos, selecionado por ser um material difundido na confecção de argamassas de regularização e nivelamento, o que aproxima a presente pesquisa com o cenário atual da indústria construtiva. A caracterização física desse material foi realizada pelo fabricante de acordo com normatização nacional NBR 16697 (2018) contemplando os ensaios de resistência à compressão (NBR 7215, 2019), massa específica (NBR 16605, 2017), expansão (NBR 11582, 2016), determinação de índice de peneiração (NBR 12826, 2014), superfície específica pelo método Blaine (NBR 16372, 2015), presença de água na pasta normal (NBR 16606, 2018) e tempo de pega (NBR 16607, 2018).

O agregado miúdo convencional foi classificado pela NBR NM 248 (2003) como areia média, com módulo de finura entre 2,40 e 3,30. O material teve sua caracterização realizada, previamente a confecção das argamassas, por meio dos ensaios de distribuição granulométrica (NBR NM 248, 2003), massa específica (NBR 16916, 2021), teor de material pulverulento (NBR 16973, 2021) e absorção do agregado (NBR 16.916, 2021).

O resíduo escolhido foi areia oriunda de construção e demolição, adquirida na usina de reciclagem Soliforte Ltda. localizada na cidade de Campo Largo – PR (Figura 22a). A seleção desse material beneficiado (Figura 22b e 22c) baseou-se no atendimento dos critérios designados pela normativa referente a agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para uso em pavimentação e em misturas sem aplicação estrutural (NBR 15116, 2021) e apresentados pela empresa em relatório de caracterização.

Figura 22 - a) Usina de reciclagem Soliforte Ltda.; b) areia proveniente de resíduo de construção e demolição; c) Última etapa do processo da reciclagem do RCD



Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 13 estão listados os ensaios realizados pela usina de reciclagem e no presente trabalho para caracterização da areia de RCD empregada nas argamassas de contrapiso.

Tabela 13- Normatização utilizada para caracterização do agregado de RCD.

Ensaio	Normas Técnicas
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (2003)
Absorção de água	NBR 16916 (2021)
Percentual de materiais não minerais	NBR 15116 – Anexo B (2021)
Teor de cloretos	NBR 9917 (2009)
Teor de sulfatos	NBR 9917 (2009)
Teor de contaminantes	NBR 15116 (2021)
Massa específica	NBR 16916 (2021)
Teor de material pulverulento	NBR 16973 (2021)
Teor de umidade	NBR 9939 (2011)

Fonte: A autora (2022).

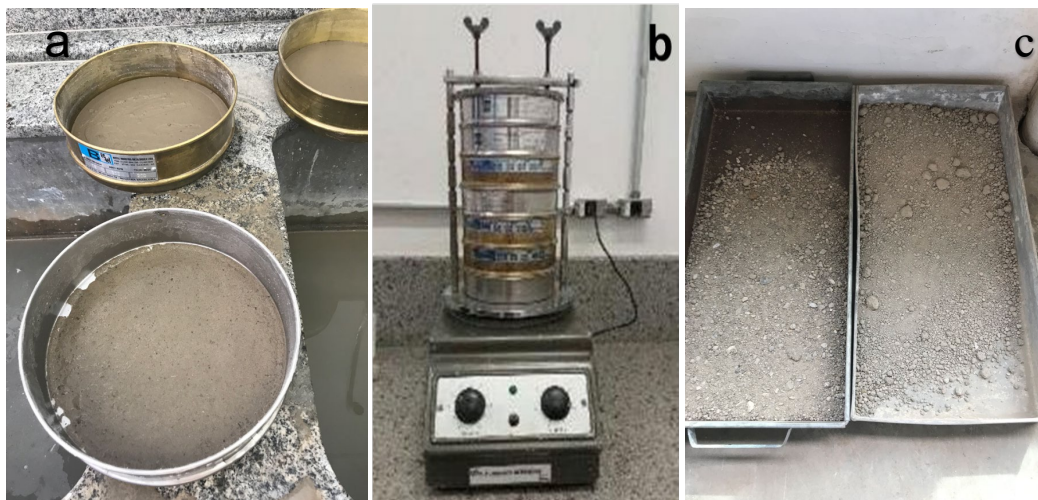
Para realização do ensaio de distribuição granulométrica (NBR NM 248, 2003) a amostra de areia de RCD foi seca em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ previamente ao processo de peneiramento (Figura 23 e 24).

Figura 23 – Ensaio de distribuição granulométrica: a) Pesagem da areia após coleta na usina; b) Secagem da areia de RCD em estufa a $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$.



Fonte: A autora (2022).

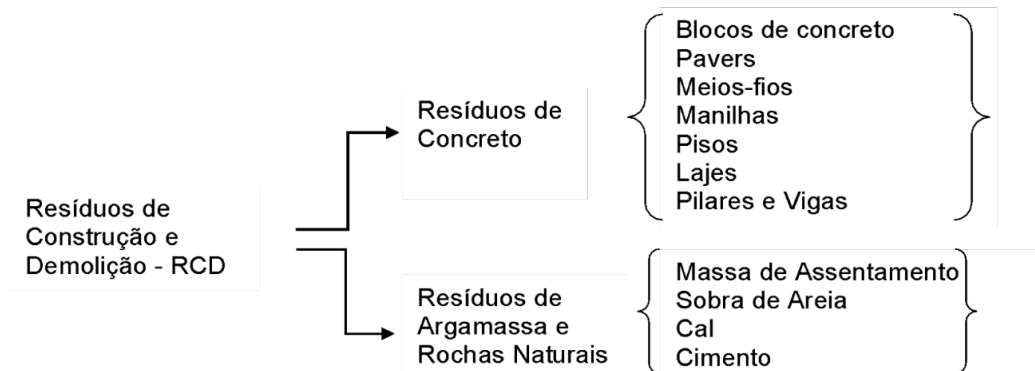
Figura 24 - Ensaio de distribuição granulométrica: a) pesagem de material retido em peneira; b) agitador de peneira eletromecânico e; c) Análise visual do tamanho de partículas da areia normal a esquerda e da areia de resíduo a direita.



Fonte: A autora (2022).

Em relação à composição da areia de RCD, na Figura 25 estão listados os materiais de construção que podem compô-la e estar presente nas argamassas do presente trabalho.

Figura 25 – Elementos componentes do RCD utilizado na produção das placas de contrapiso.



Fonte: Adaptado de Soliforte Ltda. (2022).

Em relação à classificação de resíduos sólidos definida pela NBR 15114 (2004), a areia de RCD está na classe A e pode ser aplicada como agregado em misturas com função não estrutural.

Segundo os dados cedidos pela usina de reciclagem, a areia de RCD selecionada é recomendada para aplicação em terra armada, assentamento de tubulações de esgoto, argamassa de assentamento de alvenaria de vedação, contrapiso, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação (Figura 26).

Figura 26 – Características e potenciais aplicações da areia de RCD proveniente da usina de reciclagem Soliforte Ltda.



Fonte: A autora (2022).

Além da areia de RCD, foram utilizados três materiais resilientes, separadamente, na composição dos sistemas de contrapiso, escolhidos com o intuito de aprimorar o desempenho acústico dos sistemas e atingir uma composição de contrapiso eficiente em resistir ao ruído de impacto.

Os materiais aplicados como adição são raspas de borracha triturada originadas de resíduos de pneus obtidos junto a uma recapadora de pneus, com massa específica de $1,12 \text{ g/cm}^3$ (Figura 27a); argila expandida com diâmetro médio de 20 a 30 mm e massa específica de 650 kg/m^3 (Figura 27b) e aditivo incorporador de ar da marca Vedacit com recomendação para uso de 40 mL a 120 mL para cada 100 kg de cimento dependendo do teor de ar desejado (Figura 27c).

Figura 27 – Materiais adicionados aos sistemas de contrapiso: a) Raspas de borracha; b) Argila expandida e; c) Aditivo incorporador de ar.



Fonte: A autora (2022).

A composição do traço de argamassa e a composição dos sistemas de contrapiso analisados no presente trabalho estão apresentados no item seguinte (3.3 - Definição dos traços e confecção dos sistemas de contrapiso).

3.3 Definição dos traços e confecção dos sistemas de contrapiso

A partir da caracterização prévia dos materiais e de uma variada composição de traços, foi definido o início dos estudos a partir de um traço base convencional de referência de 1:4 (cimento: agregado e relação água/cimento) com o objetivo de atingir resistência à compressão axial adequada para contrapisos, sendo este o

traço usual convencional executado nas obras de edificações. A definição da resistência mínima necessária foi estipulada por meio de uma extensa pesquisa em normas e materiais de especificações técnicas de construção civil, tendo em vista que em nenhuma norma se encontrou um valor específico para argamassa com fins de utilização em contrapiso. Este valor estipulado mínimo de resistência à compressão axial foi de 8 MPa, e de resistência mínima à aderência de 0,5 MPa. Estes valores estão de acordo com a classificação de argamassas de revestimento do tipo III para contrapiso conforme definido na NBR 13281 (2005), na ABNT NBR 7215 (2019), na ABNT NBR 13528 (2019) e na ABNT 15528 (2021). Também corrobora com a resistência mínima pretendida nesta pesquisa o constante no Caderno de Encargo da Editora PINI (1987), onde na composição para serviço de execução de argamassa para contrapiso estipula-se a resistência mínima de 8 MPa, e ainda, com as especificações técnicas de argamassas prontas comerciais encontradas no mercado. Além disso, foram executados os ensaios de densidade, índice de absorção de água e índice de vazios nos traços de argamassas selecionados.

Nas Figuras 28, 29 e 30 estão demonstradas as amostras com adição de raspas de borracha, argila expandida e aditivo incorporador de ar, respectivamente.

Figura 28 – Confeção de argamassa com raspas de borracha. a) Betoneira com a mistura prévia; b) Aspecto da argamassa contendo raspas de borracha.



Fonte: A autora (2022).

Figura 29 – Confeção de argamassa com argila expandida. a) Pesagem da mistura do agregado e argila expandida b) Aspecto da argamassa contendo argila expandida



Fonte: A autora (2022).

Figura 30 – Confeção de argamassa com aditivo incorporador de ar. Mistura da água com o aditivo.



Fonte: A autora (2022).

Para a verificação da resistência à compressão axial das misturas de argamassa foram moldados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm (Figura 31a), em conformidade com a NBR 5738 (2015) para rompimento nas idades de 7 e 28 dias. O ensaio foi realizado em prensa com capacidade de carga de 200 tf seguindo as diretrizes da NBR 5739 (2007), sendo ensaiados 3 corpos de prova por traço para cada idade de análise (Figura 31b).

Figura 31- a) Corpos de prova de argamassa moldados para caracterização por resistência mecânica; b) Realização de ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: A autora (2022).

Para a argamassa de contrapiso convencional, contendo apenas cimento Portland, areia média natural e água, foi utilizado o traço de 1:2,36:0,48 (cimento: areia: relação água/cimento), objetivando a trabalhabilidade da argamassa, o qual apresentou uma resistência mecânica acima de 29,43 MPa.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores de resistência à compressão axial obtidos para os traços contendo a areia de RCD em testes preliminares para obtenção das argamassas de contrapiso.

Tabela 14 - Resultados preliminares de resistência à compressão axial dos traços de argamassa iniciais da pesquisa contendo areia de RCD.

Argamassas	Traço referência	Traço real ajustado	Idade de análise	Tensão média (MPa)
Com 100% de areia de RCD	1 : 4	1 : 2,36 : 0,48	7 dias	2,846
		1 : 3,84 : 1,79		3,846
		1 : 2,26 : 1,04		7,087
		1 : 2,26 : 1,06		8,284
Com 70% de areia de RCD		1 : 1,36 : 0,70 : 0,94		9,086

Fonte: A autora (2022).

Inicialmente, foram realizados diversos estudos em traços de argamassa para que ocorresse a substituição completa da areia média convencional pela areia

oriunda de processos de reciclagem de RCD, porém em razão da trabalhabilidade e das resistências atingidas inicialmente com essas amostras em diversos testes, optou-se pela mistura de 70% de areia de RCD com 30% de areia média natural. Com relação a inserção das raspas de borracha de pneu na mistura, destaca-se ainda que foi necessária uma maior mistura entre a areia de RCD e a areia média normal comercializada, na ordem de 50% de cada uma delas, para se atingir a resistência mecânica e a trabalhabilidade adequada. Nas argamassas com adição de argila expandida e aditivo incorporador de ar, foi possível manter a mesma composição inicial, com uma porcentagem de 70% de areia de RCD na argamassa.

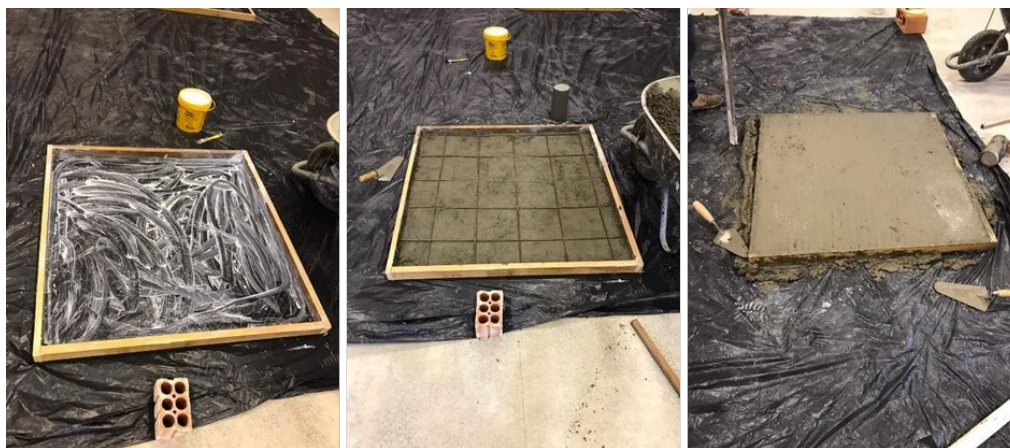
A mistura de argamassa com 5% de raspas de borracha em massa, com relação a soma da massa da areia natural e da areia de RCD, adotando um traço (1:1,15:1,15:0,12:0,55), obteve uma resistência mecânica a compressão axial aos 28 dias de 11,06 MPa, o que ficou acima do valor de 8 MPa, de acordo com a classificação de argamassas de revestimento do tipo III para contrapiso conforme definido na NBR 13281 (2005), na ABNT NBR 7215 (2019), na ABNT NBR 13528 (2019) e na ABNT 15528 (2021). Também corrobora com a resistência mínima pretendida nesta pesquisa o constante no Caderno de Encargo da Editora PINI (1987), onde na composição para serviço de execução de argamassa para contrapiso estipula-se a resistência mínima de 8 MPa, e ainda, com as especificações técnicas de argamassas prontas comerciais encontradas no mercado.

3.3.1 Sistemas de contrapiso sem revestimento

Posteriormente à definição do traço que atendesse às exigências de resistência à compressão foram moldadas as placas de contrapiso com 5 cm de espessura e 1 m² de área. Foram realizadas as seguintes misturas: argamassa com areia média natural para fins comparativos; argamassa com areia média natural e areia de RCD; argamassa com areia média natural, areia de RCD e adição de raspas de borracha (Figura 28); argamassa com areia média natural, areia de RCD e adição de argila expandida (Figura 29); e argamassa com areia média natural, areia de RCD e acréscimo de aditivo incorporador de ar (Figura 30).

Para confecção das misturas, os agregados foram inicialmente separados e houve correção de umidade por meio de amostras para manter a relação água/cimento definida no traço da argamassa de contrapiso convencional. A montagem das placas está apresentada da Figura 32, sendo importante salientar que foi inserida uma malha de aço com espaçamento de 15x15 cm para impedir que houvesse o aparecimento de trincas na placa durante o processo de cura e para facilitar o posicionamento destas na câmara de análise acústica.

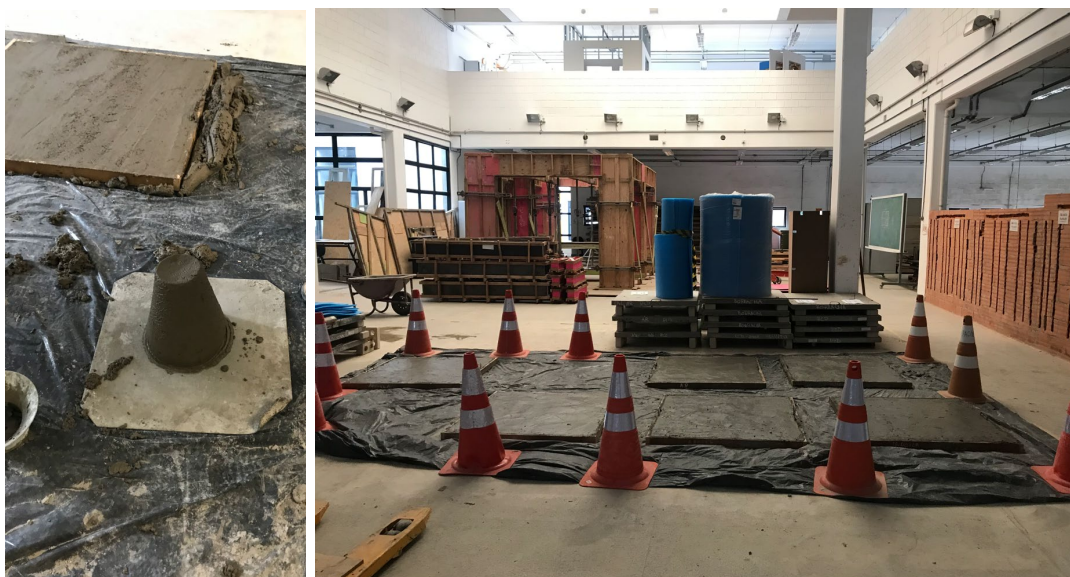
Figura 32– Moldagem das placas de contrapiso.



Fonte: A autora (2022).

Na figura 33, observa-se o também o *slump test* para a confecção das placas e também o canteiro de obras experimental com as placas sendo confeccionadas e armazenadas após o tempo de cura.

Figura 33– Moldagem das placas de contrapiso. a) *Slump test*; b) Visão do canteiro de obras experimental durante o processo de confecção das placas



Fonte: A autora (2022).

Após a moldagem das placas foram realizados os testes de resistência à compressão axial (NBR 5739, 2018) nas amostras retiradas das argamassas, onde foram feitos 3 corpos de provas por betonada, esse procedimento foi realizado para averiguar se a resistência das placas produzidas ficou de acordo com o que havia sido definido previamente na fase de escolha dos traços. Na Figura 34 está ilustrado o ensaio dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 34 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas utilizadas para confecção das placas de contrapiso: a) Corpos de prova recém moldados; b) Realização de ensaio na prensa; c) Corpo de prova rompido ao final do ensaio.

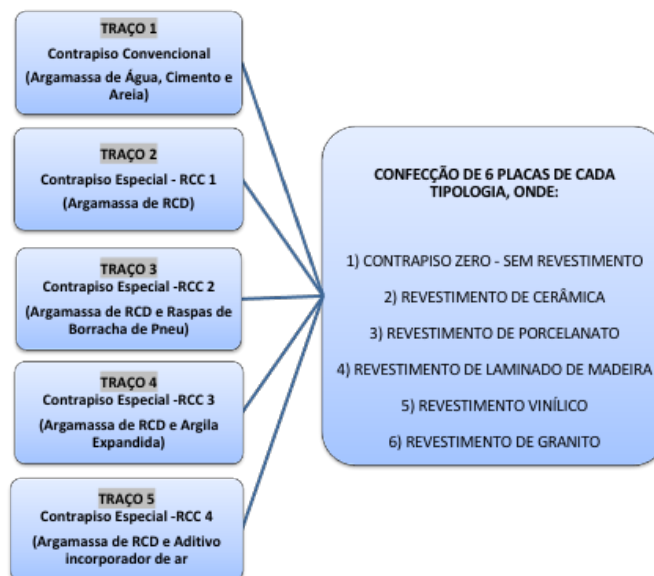


Fonte: A autora (2022).

3.3.2 Sistemas de contrapiso com revestimento

As seis placas confeccionadas para cada traço foram base para a montagem de contrapisos especiais com aplicação de diferentes revestimentos superficiais (cerâmico, porcelanato, laminado, vinílico e granito), e permanecimento de placas sem revestimento (contrapiso zero) para fins comparativos, totalizando 30 placas. Na Figura 35 estão dispostas todas as combinações de placas ensaiadas durante a pesquisa.

Figura 35– Combinação de placas de contrapiso analisadas abrangendo os traços de argamassa e os tipos de revestimentos aplicados



Fonte: A autora (2022).

As placas de contrapiso foram limpas superficialmente e preparadas para receber a instalação de seus respectivos revestimentos, conforme Figura 36.

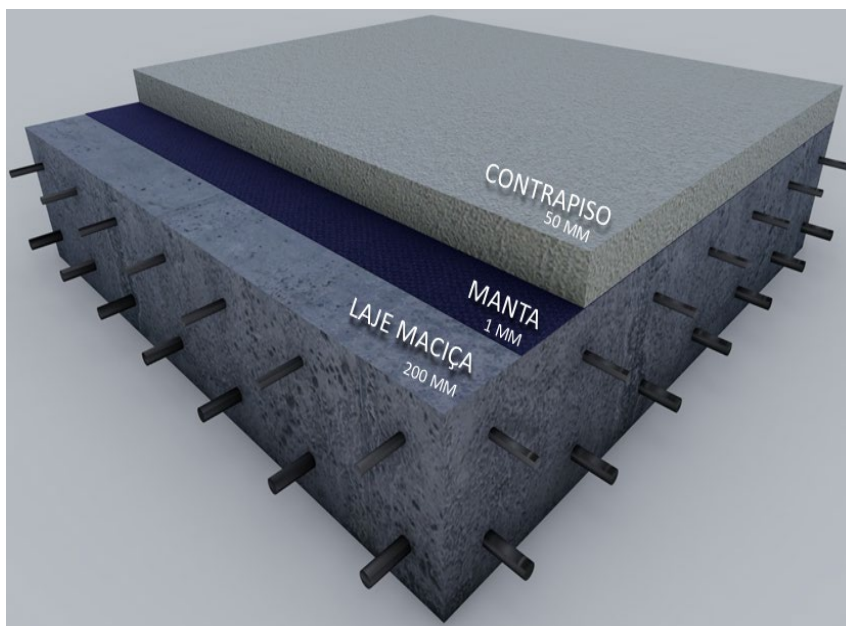
Figura 36– Contrapisos alinhados para aplicação de revestimento.



Fonte: A autora (2022).

A configuração dos sistemas de contrapiso especiais consiste em uma base de concreto armado com 200 mm para realização da análise de desempenho acústico (laje), uma manta asfáltica para separar a estrutura do contrapiso posicionado a seguir, as placas moldadas anteriormente com 50 mm de altura. Na Figura 37 está apresentado a configuração das placas de contrapiso especial sem revestimento (contrapiso zero).

Figura 37– Montagem de contrapiso especial sem revestimento (contrapiso zero).



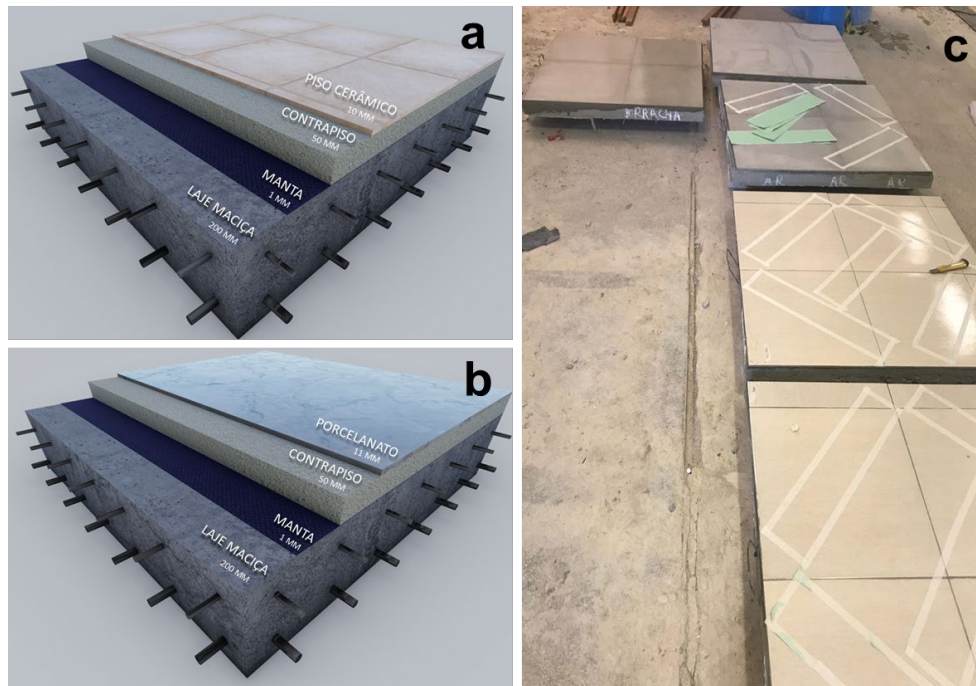
Fonte: A autora (2022).

Foram utilizadas diferentes técnicas de fixação para os revestimentos. Sendo aplicada a argamassa colante AC III para fixar o porcelanato e a cerâmica às placas. O porcelanato é um tipo de revestimento vítreo, que não apresenta porosidade para a absorção de água, fazendo com que não seja adequado seu assentamento com argamassas com pouco poder de fixação, justifica-se portanto a utilização da argamassa colante AC III, a qual possui grande poder de aderência, independente do material a ser assentado.

O revestimento cerâmico foi assentado utilizando-se da mesma argamassa colante do tipo ACIII, em razão de economia de material, praticidade do processo e do tamanho das placas de contrapiso, as quais tinham tamanho reduzido para justificar uma mudança de material colante. Na Figura 38 estão demonstradas as configurações completas dos contrapisos especiais com revestimento cerâmico e de porcelanato, bem como a real aplicação dos revestimentos realizada nas placas.

Nas placas revestidas com piso vinílico e piso laminado (Figura 39), foi utilizada uma cola específica, garantindo sua adequada fixação e não agredindo o piso vinílico, o qual é mais suscetível à agressões à cola devido a sua espessura reduzida.

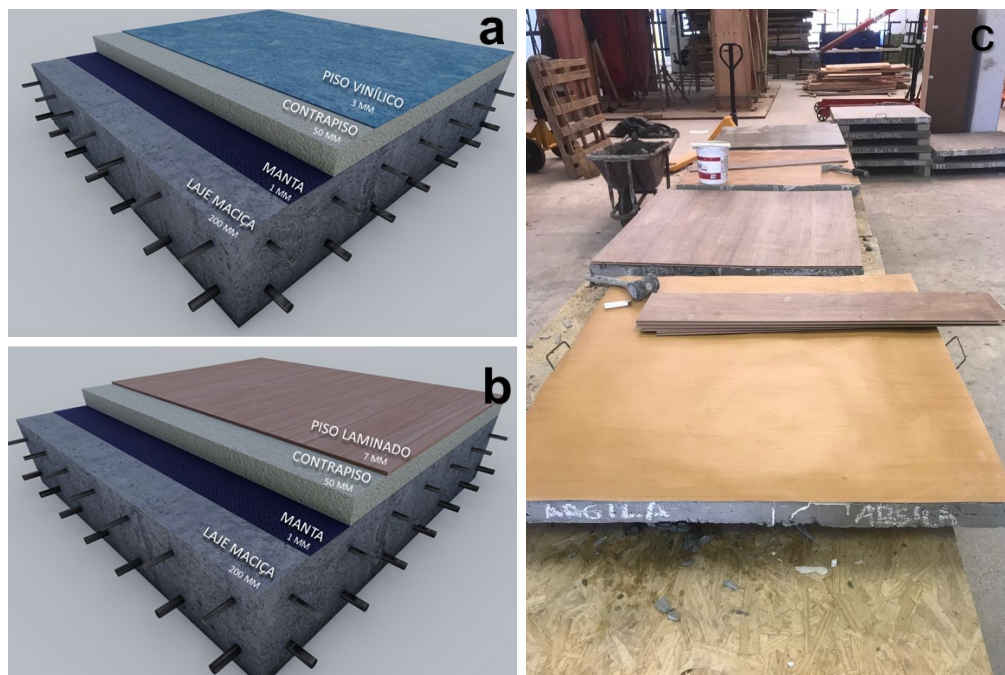
Figura 38– Sistemas de contrapiso especiais: a) Com revestimento cerâmico; b) Com revestimento de porcelanato; c) Aplicação de revestimento cerâmico e de porcelanato nas placas de contrapiso.



Fonte: A autora (2022).

Na Figura 39 estão apresentadas as placas revestidas com piso vinílico e piso laminado, e ilustrados os sistemas de contrapiso especiais completos com a presença desses revestimentos.

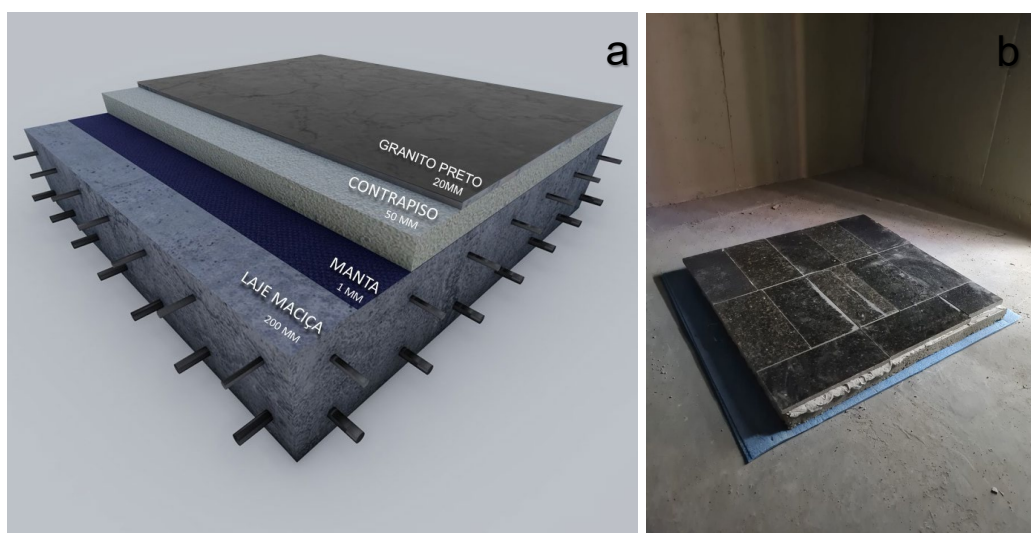
Figura 39– Sistemas de contrapiso especiais: a) Com piso vinílico; b) Com piso laminado; c) Aplicação de piso vinílico e laminado nas placas de contrapiso.



Fonte: A autora (2022).

Por fim, na Figura 40 estão apresentadas as placas revestidas com piso de pedra de granito, e ilustrado o sistema de contrapiso especial completo com a presença desse revestimento.

Figura 40–Sistemas de contrapiso especiais: a) Com piso de granito; b) Aplicação de granito nas placas de contrapiso.



Fonte: A autora (2022).

As placas de contrapiso e os sistemas de contrapiso especiais foram analisados em relação ao seu desempenho acústico, os procedimentos estão expressos na seção seguinte (3.4 - Procedimentos para análise do desempenho acústico de sistemas de contrapiso especiais).

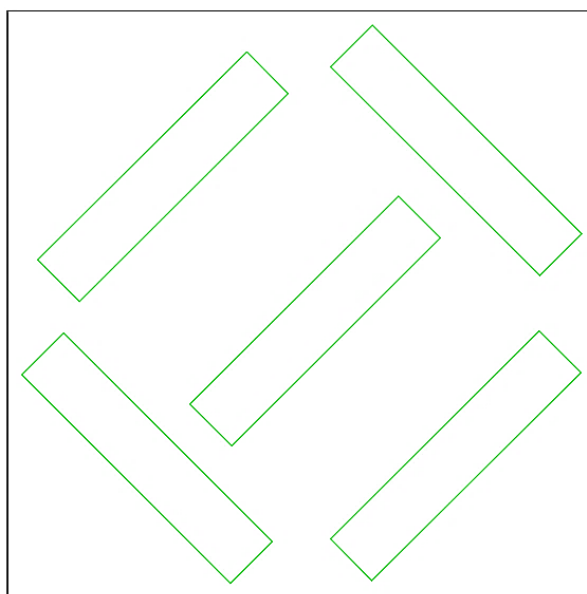
3.4 Procedimentos para análise do desempenho acústico de sistemas de contrapiso especiais

A análise acústica deve ser realizada em campo, somente após a finalização plena da construção, isto é, após a instalação dos revestimentos na superfície a ser ensaiada, bem como seus componentes (como rodapés, por exemplo), para verificar inclusive a influência do ruído aéreo no sistema. Porém, em razão da característica experimental desse estudo, visando a comparação entre os materiais componentes dos contrapisos, oriundos da reciclagem de rejeitos da construção, foi realizada a instalação dos contrapisos na placa de 1 m² quadrado de laje a ser ensaiada, respeitando a distância das paredes recomendadas por norma.

O ensaio foi então realizado, preliminarmente, na laje sem o contrapiso, para fins de comparação, e nas placas de contrapiso produzidas com areia média natural (convencional), areia de RCD (RCC 1), areia de RCD e raspas de borracha de pneu (RCC 2), areia de RCD e argila expandida (RCC 3), e areia de RCD e aditivo incorporador de ar (RCC 4). Na sequência, o ensaio foi realizado nos sistemas de contrapiso especiais contendo os revestimentos de cerâmica, porcelanato, piso vinílico, piso laminado e granito.

Para realização da análise acústica a superfície dos revestimentos foi demarcada com uso de fita crepe em cinco posições para a *Tapping Machine* ser posicionada na fase dos ensaios acústicos, com o cuidado de não sobrepor espaços e nem repetir posições nos ensaios. As demarcações estão esquematizadas na Figura 41.

Figura 41- Demarcações na placa de contrapiso para o posicionamento da *tapping machine*.

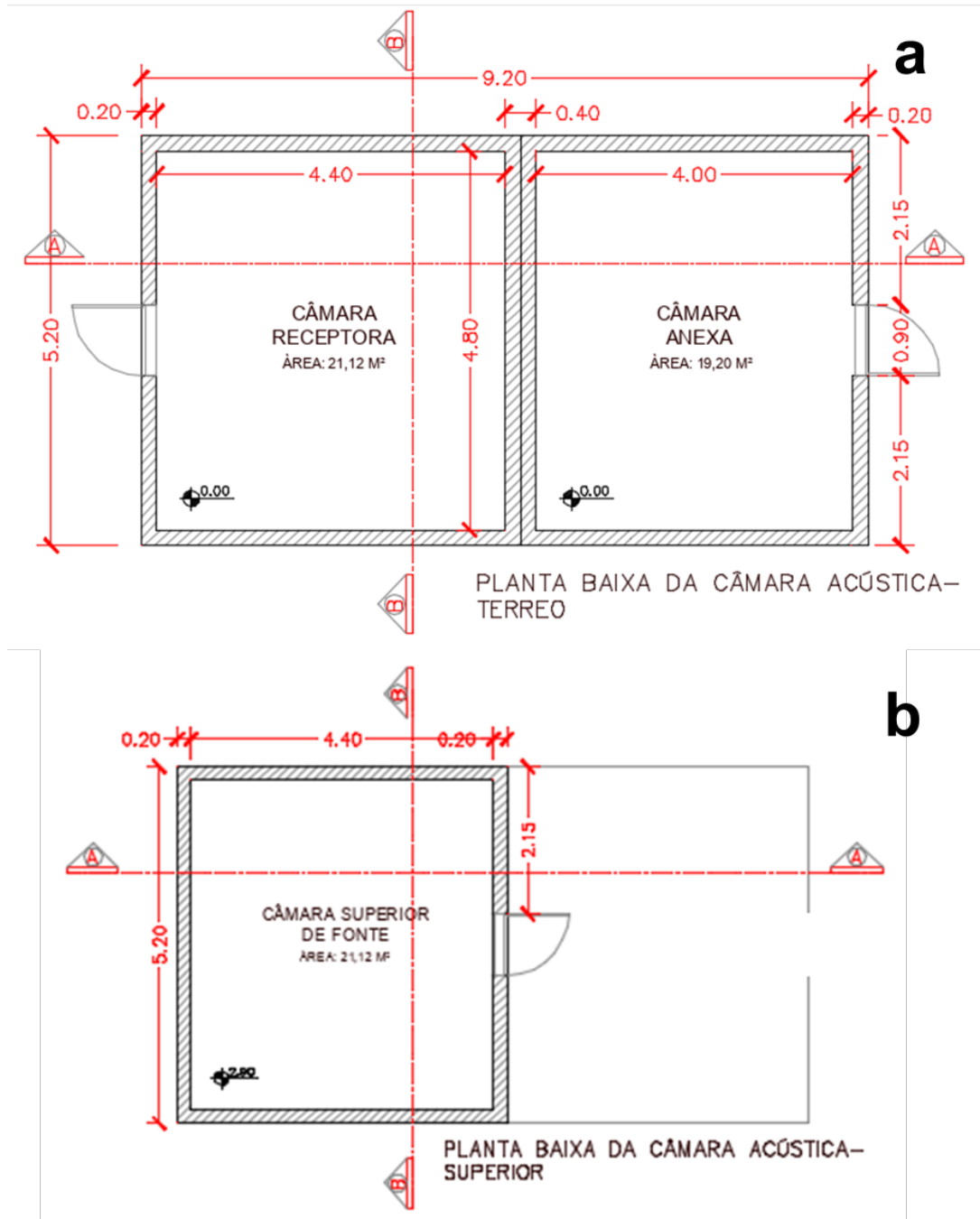


Fonte: A autora (2022).

A metodologia de verificação da redução do ruído de impacto descrita na normativa ISO 10140 (2021) “*Acústica - Medição laboratorial de isolamento acústico de elementos de construção - Parte 3: Medição de isolamento acústico de impacto*”, requer o uso de câmaras acústicas padrão. Portanto, foi construída a Câmara Acústica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), de acordo com as normas técnicas necessárias, conforme detalhamento de projeto demonstrado nas Figuras 42, 43 e 44.

Figura 42– Câmara acústica UTFPR

a) Planta baixa térreo; b) Planta baixa superior.



Fonte: A autora (2022).

Figura 43– Câmara acústica UTFPR: a) Corte AA; b) Corte BB.

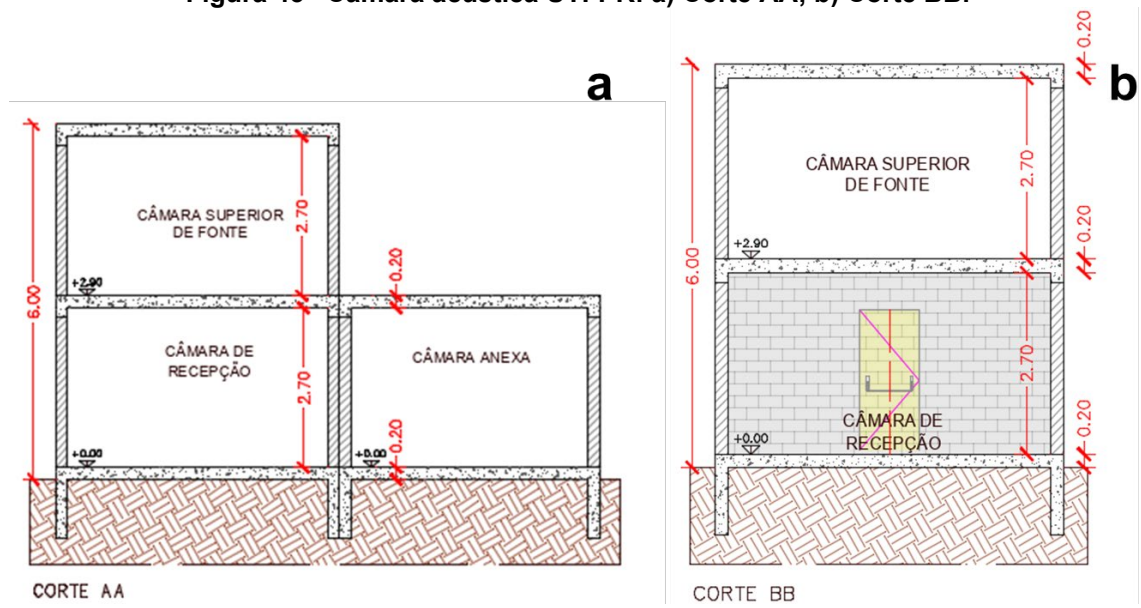
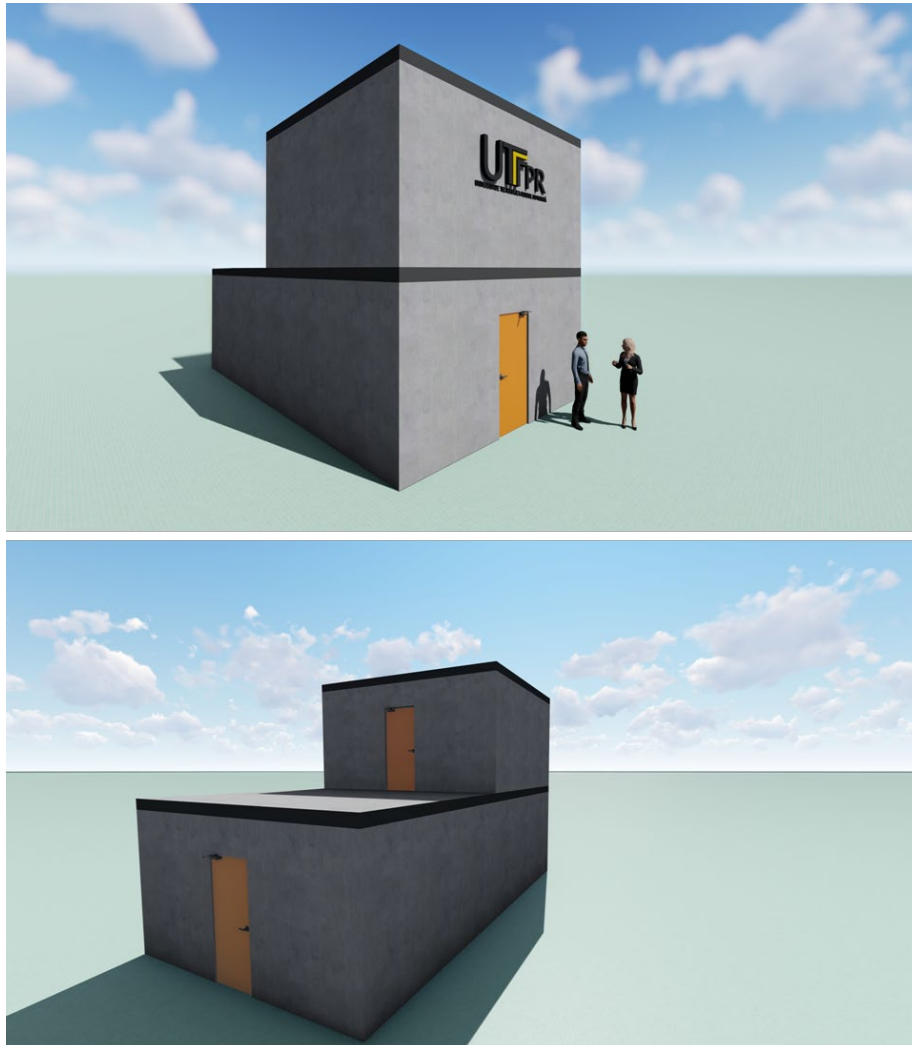


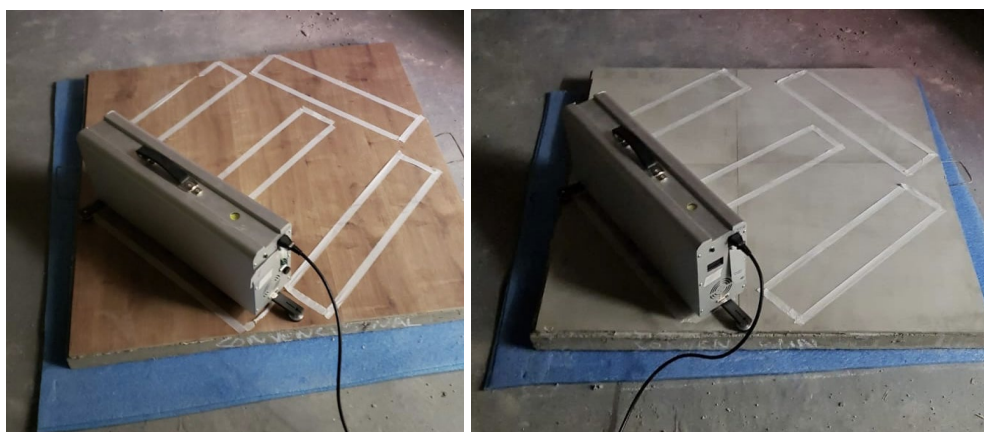
Figura 44– Volumetria da câmara acústica UTFPR.



As medições foram efetuadas com o auxílio do equipamento denominado “*Tapping Machine*”, que permite realizar medições de ruídos de impactos conforme as diferentes normas internacionais, e de acordo com o que orienta a NBR 15575-(2021). De acordo com Mojolla (2015), a “*Tapping Machine*” é um equipamento padronizado de acordo com a normativa ISO 10140 (2021) “*Acústica - Medição laboratorial de isolamento acústico de elementos de construção - Parte 3: Medição de isolamento acústico de impacto*”, que consiste em uma máquina com cinco cilindros metálicos que impactam sequencialmente a superfície do piso a ser avaliado. Sendo assim, é a única fonte padrão permitida para medição de ruído de impacto.

Para a realização dos ensaios, a fonte emissora do ruído de impacto padronizado (*Tapping Machine*) foi posicionada na sala superior à sala onde foram feitas as medições por meio do analisador de frequências (sala receptora), conforme esquematizado na Figura 49. Separando ambas as salas, foi posicionado o sistema de contrapiso a ser ensaiado. Acima dele estará posicionada a *Tapping Machine* nas cinco posições pré-estabelecidas com a fita (Figura 45).

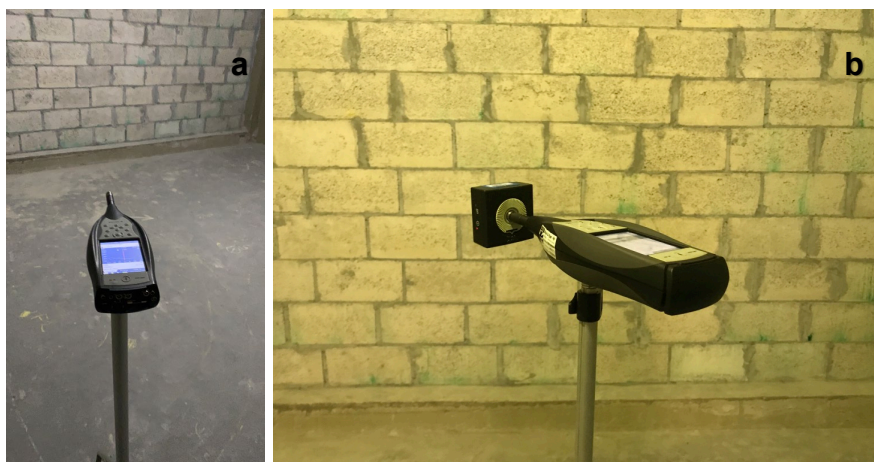
Figura 45 – Posicionamento da *Tapping Machine* para realização do ensaio acústico.



Fonte: A autora (2022).

O medidor de nível sonoro (sonômetro) utilizado foi o modelo *B&K 2250 Light*, classe 1, da marca *Brüel&Kjaer*. O sonômetro estava calibrado e certificados por empresa cadastrada na Rede Brasileira de Calibração (RBC) e devidamente de acordo com a norma *International Electrotechnical Commission*. Os medidores foram ajustados antes e após cada série de medições, com calibrador acústico da marca *Brüel&Kjaer*, conforme ilustrado na Figura 46.

Figura 46 - Analisador modelo B&K 2250 Light, classe 1, na câmara acústica. a) Analisador posicionado na câmara receptora, a uma altura de 1,00m da emissão; b) Analisador sendo calibrado



Fonte: A autora (2022).

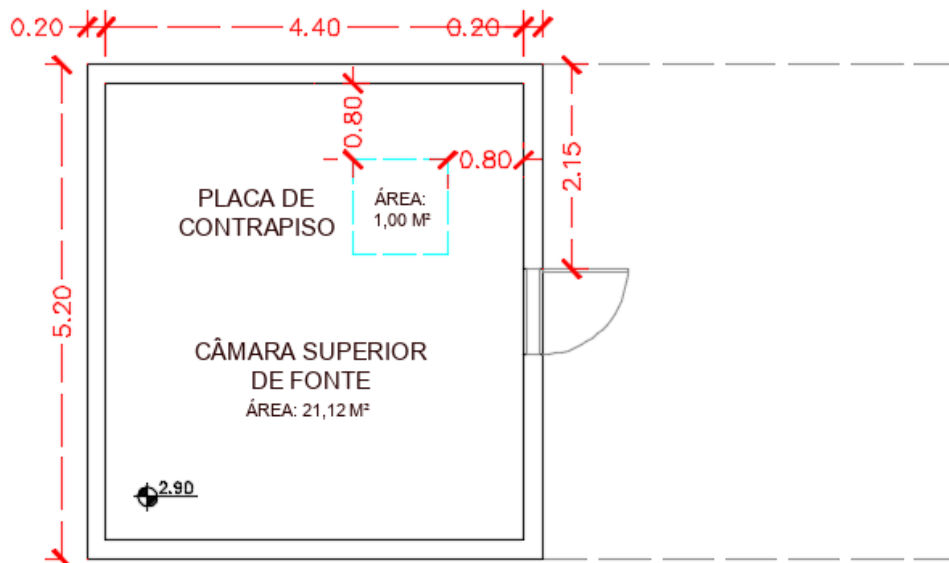
O analisador B&K 2250 Light foi configurado para obter-se a grandeza acústica de valor máximo observado (LZFmax), pois por ser medição de laboratório é necessária a utilização do espectro “Z” ou espectro linear, que é o nível de pressão sonora pura, sem ponderação, ou seja, o db medido na fonte, sem tratamento.

Após o início da emissão do ruído de impacto, foram realizadas medições na sala receptora (nível inferior) utilizando o analisador de frequências a 1,0 m de altura da laje superior, o qual foi operado por uma pessoa em todo o período de emissão do ruído. Estas medições foram feitas em todos os cantos da sala e em seu centro para cada faixa de frequência situada entre os valores de 100 a 3150 Hz.

A análise acústica foi embasada na NBR 15575 (2021) e nas demais normas nela referenciadas para ensaio acústico. Os passos estão descritos a seguir:

- a) A placa de contrapiso foi posicionada em um dos cantos da câmara superior a uma distância de 80 cm das paredes (Figura 47 e 48) e realizada nela as marcações para posicionamento da máquina geradora de ruído a *Tapping Machine*, os pontos foram de 1 a 5;

Figura 47 – Desenho esquemático do posicionamento da placa de contrapiso de materiais alternativos dentro da câmara acústica superior.



Fonte: A autora (2022)

Figura 48 – Posicionamento da placa de contrapiso de materiais alternativos dentro da câmara acústica superior

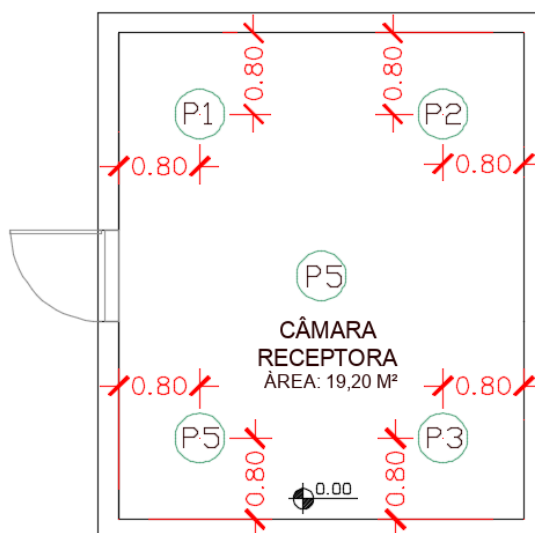


Fonte: A autora (2022).

- b) Posteriormente, a *Tapping Machine* foi posicionada no Ponto 1 da placa de contrapiso localizada na sala superior e na sala inferior da câmara acústica ficou o analisador de frequência. Este mudava de posição a cada 15 s, conforme Figura 49, ou seja, com a *Tapping Machine* acionada (gerando ruído de impacto) na posição 1 da placa de

contrapiso, o analisador de ruído ficou no Ponto 1 (P1) da sala inferior medindo o ruído por 15 s, posteriormente mudou para a posição 2 (P2) e mediu mais 15 s, e sucessivamente até a posição 5 (P5), ponto este central da sala receptora;

Figura 49 – Desenho esquemático da sala receptora: Posições do analisador de frequência para medições.



Fonte: A autora (2022).

- c) Em seguida, mudou-se a *Tapping Machine* para a Posição 2 da placa e repetiu-se os deslocamentos com o analisador de frequência na sala inferior (Figura 49). Todo o processo se repetiu até o quinto ponto da placa, totalizando 25 medições de ruído de impacto por placa;
- d) Antes de fazer os ensaios em cada placa de contrapiso foi realizado o ensaio diretamente na laje da câmara seguindo os mesmos passos do item “a” ao “c”.

Para a apresentação dos resultados, de acordo com a ISO 10140 (2021), foi necessário o deslocamento da curva padrão, a qual está apresentada na Tabela 15, com incrementos de 1 dB em direção da curva medida até que o valor da soma dos desvios não favoráveis seja tão grande quanto possível, porém não maior do que 32 dB.

Tabela 15– Valores de referência para o impacto sonoro

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
Valores de referência (dB)	62	62	62	62	62	62	61	60
Frequência (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Valores de referência (dB)	59	58	57	54	51	48	45	42

Fonte: Adaptado de ISO 10140 (2021)

Os valores presentes na Tabela 15 fornecem a curva padrão com código gerado na linguagem de programação estatística “R” para seu deslocamento, a qual permite a comparação entre os sistemas de contrapiso testados.

O nível de pressão sonora de impacto medido na sala receptora, por sua vez, deve ser normalizado de acordo com a ISO 10140 (2021) utilizando-se da Fórmula 1 para levar em conta as variáveis consideradas em ensaios acústicos.

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (1)$$

Onde:

L'_n é o nível de pressão de impacto sonoro normalizado.

L_i é o nível de pressão de impacto sonoro na sala receptora (dB), é o impacto medido experimentalmente através do analisador de frequências.

$A = \frac{0,16 \cdot V}{TR}$ onde: V= Volume da sala de recepção e TR = Tempo de Reverberação.

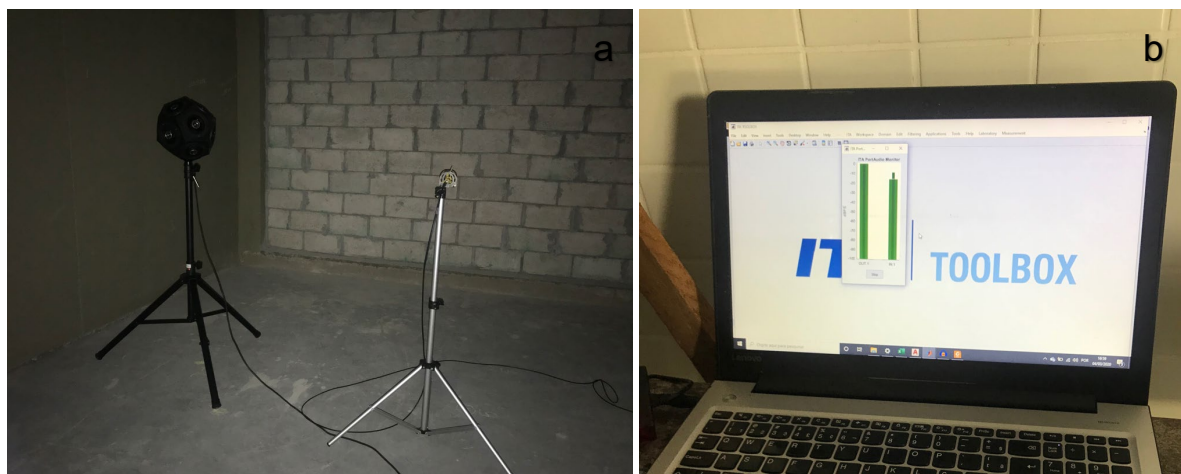
A_0 é a área de referência (igual a 10m²), de acordo com a ISO 10140.

Para o tempo de reverberação na sala receptora (TR), foi executado um ensaio a parte que determine este parâmetro, o qual ajusta o nível de pressão sonora de impacto, conforme demonstrado na Figura 50. Utilizou-se o *Software Matlab e ITA Toolbox (Toolbox pro MATLAB) - MATLAB 2019b*, conforme ilustrado na Figura 50b, para o tratamento dos dados coletados pelo microfone e pelo analisador de frequência.

Também para o ensaio de tempo de reverberação foi utilizada uma fonte sonora omnidirecional dodecaédrica (DDC-100), amplificador e acessórios, conforme Figura 50a. O DDC-100 utilizado é uma fonte sonora omnidirecional de banda larga, construído a partir de 12 alto-falantes dispostos na forma de dodecaedro regular, desenvolvido pela GROM para atender às exigências de espectro e direcionalidade das normas da série ISO 10140 (2021) e da NBR 15575 (2021). Os alto-falantes são de alta performance e baixa distorção harmônica, interligados eletricamente em fase, e também um microfone *GRAS 46AZ 1/2" CCP Free-field Standard Microphone Set*,

Low Frequency. Freq range (± 3 dB): 0.5 Hz to 20 kHz. Dyn range: 17 dB(A) to 138 dB. Sensitivity: 50 mV/Pa.

Figura 50 – Ensaio de Tempo de Reverberação. a) Posição da fonte sonora omnidirecional dodecaédrica e microfone; b) Software Matlab e ITA Toolbox (Toolbox pro MATLAB)



Fonte: A autora (2022).

Tendo em vista que a reverberação é o fenômeno anulatório relacionado à reflexão de ondas sonoras com intervalo de tempo necessário para a percepção do som refletido por um obstáculo qualquer, deve-se descontar o efeito da reverberação no nível de pressão sonora de impacto, para que não haja a interferência de ondas indesejadas nos resultados finais do ensaio.

O tempo de reverberação (TR) foi medido nos dias de realização do ensaio, pois este depende de variáveis climáticas, da temperatura e também da pressão atmosférica, resultando em um valor diferente para cada dia em que forem realizados ensaios na câmara reverberante.

E assim, é feita as médias logarítmicas em cada frequência para cada posição de fonte.

Por fim, para obtenção dos resultados finais, a redução do som do impacto foi calculada por meio da diferença entre os níveis de pressão sonora obtidos com e sem a solução testada.

A análise acústica de desempenho dos sistemas de contrapiso em relação ao ruído de impacto abrangeu os traços de argamassa produzidos e as diferentes condições de revestimento presentes no trabalho, possibilitando uma comparação ampla baseando-se nos valores normatizados na NBR 15575 (2021) e na ISO 10140 (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos referentes a caracterização dos materiais dos sistemas de contrapisos confeccionados e ao desempenho acústico dos sistemas construtivos; abrangendo as conclusões propiciadas pela interpretação e discussão dos dados.

4.1 Caracterização dos materiais

Na Tabela 16 estão dispostos os resultados de caracterização do cimento CPV-ARI, sendo que os valores atendem os requisitos de cimento Portland presentes na NBR 16697 (2018).

Tabela 16 – Caracterização do cimento.

Ensaio	Cimento CPV-ARI
Resistência à compressão (MPa) – 7 dias	≥ 34 MPa
Massa específica (g/cm³)	3,12
Expansão (mm)	≤ 5,0
Índice de peneiração (%) – 75 µm	≤ 6,0
Superfície específica de Blaine (cm²/g)	≥ 3000
Água na pasta normal (%)	28,58
Tempo de pega (min) – Início	246
Tempo de pega (min) – Fim	310

Fonte: Adaptado de Supremo Secil Cimentos (2022).

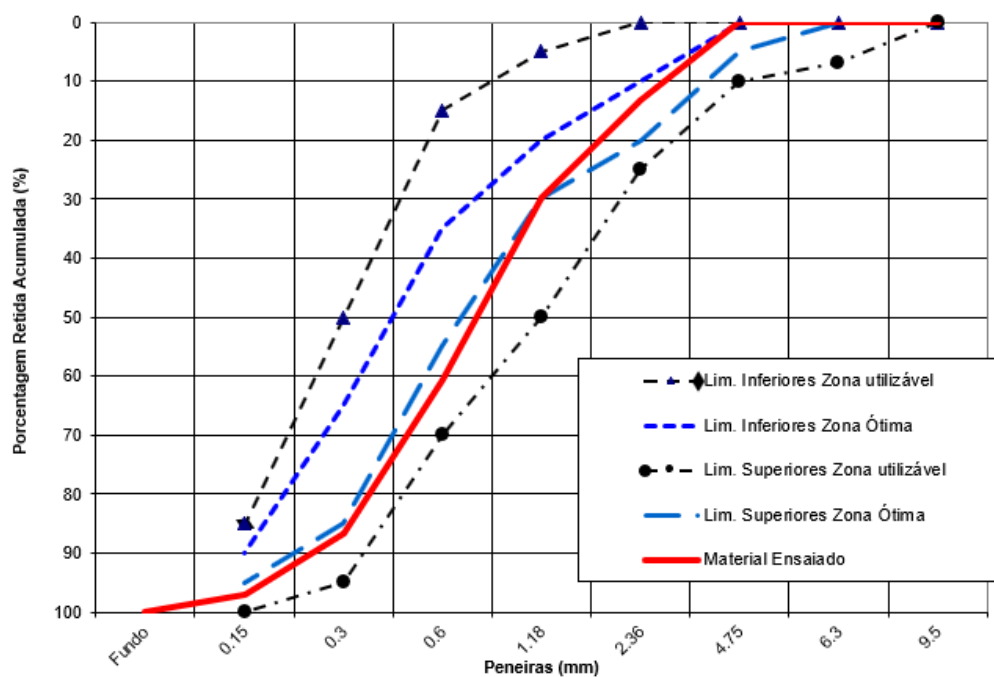
Em relação ao agregado miúdo convencional, este apresenta módulo de finura de 2,87 e diâmetro máximo característico de 4,75 mm. Os resultados de caracterização física do agregado estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 51.

Tabela 17– Resultados da caracterização do agregado miúdo convencional.

Ensaio	Agregado miúdo convencional
Massa específica (g/cm³)	2,23
Teor de material pulverulento (%)	4,52
Teor de umidade (%)	4,37

Fonte: A autora (2022).

Figura 51– Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo convencional.



Fonte: A autora (2022).

Pela curva granulométrica apresentada na Figura 51, observa-se que o agregado miúdo possui uma graduação relativamente contínua, encaixando-se na zona utilizável da NBR 7211 (2009) o que o torna adequado para utilização.

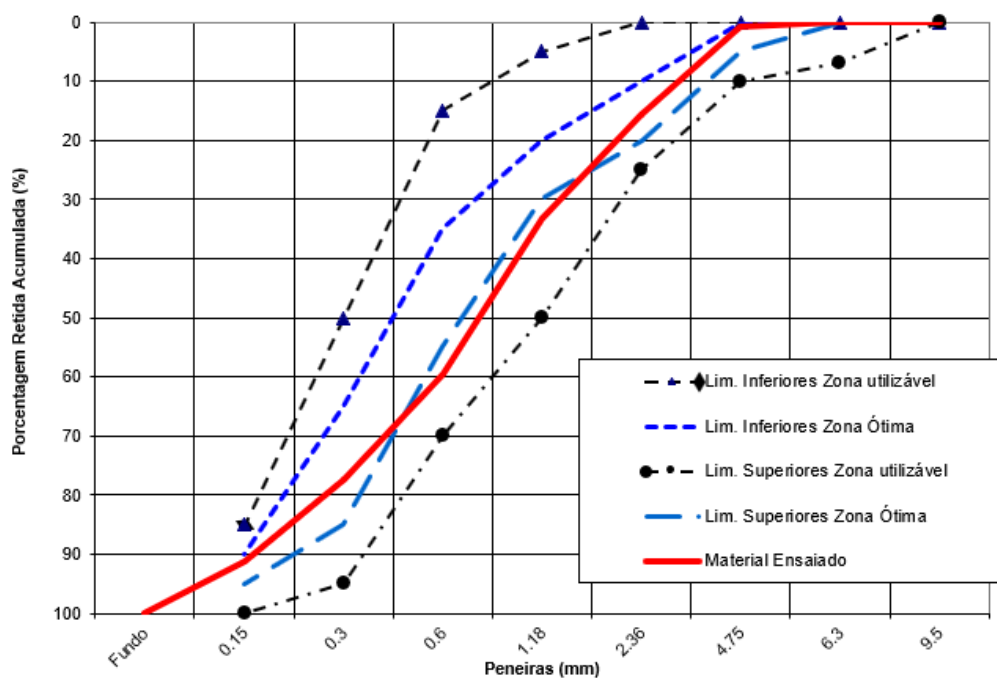
As características físicas do agregado de RCD empregado no trabalho estão descritas na Tabela 18 e na Figura 52, sendo que este apresentou módulo de finura de 2,78 e diâmetro máximo característico de 4,75 mm.

Tabela 18 – Resultados da caracterização do agregado de RCD.

Ensaio	Agregado miúdo de RCD
Absorção de água (%)	< 12
Materiais não minerais (%)	< 2
Teor de cloretos (%)	< 1
Teor de sulfatos (%)	< 1
Teor total máximo de contaminantes (%)	< 3
Massa específica (g/cm ³)	2,30
Teor de material pulverulento (%)	14,31
Teor de umidade (%)	20,37

Fonte: A autora (2022).

Figura 52 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo de RCD.



Pela curva granulométrica apresentada na Figura 52, observa-se que o agregado de RCD possui uma graduação contínua, encaixando-se na zona utilizável e quase compondo a zona ótima da NBR 7211 (2009), sendo este adequado para utilização.

4.2 Caracterização mecânica dos contrapisos

Nas tabelas a seguir estão apresentadas as características das argamassas criadas e os resultados de resistência à compressão axial obtidos aos 7 e 28 dias para os traços utilizados para produzir as placas de contrapiso.

Na Tabela 19 apresenta-se a densidade da argamassa, conforme ensaio da NBR 13278 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Tabela 19 – Densidade aparente das argamassas de contrapiso.

Argamassas	Densidade aparente (kg/m³)
Convencional	1974,52
Com areia de RCD (RCC 1)	1656,05
Com areia de RCD e raspas de borracha (RCC 2)	1433,12
Com areia de RCD e argila expandida (RCC 3)	1337,58
Com areia de RCD e aditivo incorporador de ar	1592,36

Fonte: A autora (2022).

Analisando-se a Tabela 19, observa-se que a argamassa contendo areia de RCD e argila expandida teve a menor densidade em comparação aos demais sistemas de contrapiso, sendo o valor obtido de 1.337,58 kg/m³. Já a densidade aparente do contrapiso de RCD com raspas de borracha é de 1.433,12 kg/m³; com RCD e aditivo incorporador de ar é de 1.592,36 kg/m³; e, com areia de RCD é de 1.656,08 kg/m³, sendo que o contrapiso convencional teve a maior densidade aparente, com o valor de 1974,52 kg/ m³.

Na Tabela 20 apresenta-se a absorção de água e o índice de vazios para os traços de argamassas, conforme descrito da NBR 9778 (2005) – Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e massa específica.

Tabela 20 – Resultados da caracterização da argamassa com relação a absorção de água e o índice de vazios aos 28 dias

Argamassas	Absorção (%)	Índice de Vazios (m³)
Convencional	14,30	23,43
Com areia de RCD (RCC 1)	26,55	33,59
Com areia de RCD e raspas de borracha (RCC 2)	37,06	38,71
Com areia de RCD e argila expandida (RCC 3)	48,95	45,35
Com areia de RCD e aditivo incorporador de ar	28,78	38,28

Fonte: A autora (2022).

Analisando-se a Tabela 20, observa-se que conforme substituiu a areia natural média pela areia de RCD, obteve-se maior absorção e maior índice de vazios nas argamassas, onde a amostra de RCC3 com RCD e acréscimo de argila expandida obteve uma absorção de 48,95% e índice de vazios de 45,35%, sendo estes os valores máximos encontrados.

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados à compressão axial e o respectivos traços das argamassas.

Tabela 21 – Resultados de resistência à compressão axial das argamassas utilizadas para a confecção das placas de contrapiso.

Argamassas	Traço de referência	Traço real ajustado	Idade de análise	Tensão (MPa)	Média (MPa)
Convencional	1 : 4	1 : 2,36 : 0,48	7 dias	18,50	17,22
				19,13	
				14,04	
			28 dias	32,99	29,43
				21,37	
				33,94	
Com 70% de areia de RCD e 30% de areia média (RCC 1)	1 : 4	1 : 1,36 : 0,70 : 0,94	7 dias	9,63	9,09
				8,59	
				9,04	
			28 dias	11,64	12,52
				12,85	
				13,08	
Com 50% de areia de RCD, 50% de areia média e raspas de borracha (RCC 2)	1 : 4	1 : 0,92 : 1,11 : 0,12 : 0,84	7 dias	8,09	11,06
				13,51	
				11,58	
			28 dias	10,60	11,83
				11,80	
				13,08	
Com 70% de areia de RCD, 30% de areia média, e argila expandida (RCC 3)	1 : 4	1 : 1,25 : 0,64 : 0,20 : 0,91	7 dias	13,33	12,10
				12,00	
				10,99	
			28 dias	14,92	14,50
				15,84	
				12,75	
Com 70% de areia de RCD, 30% de areia média, e aditivo incorporador de ar (RCC 4)	1 : 4	1 : 1,36 : 0,70 : 1,20 : 0,94	7 dias	11,97	12,64
				12,66	
				13,30	
			28 dias	17,23	15,50
				15,10	
				14,17	

Fonte: A autora (2022).

Analisando-se a Tabela 21, os valores obtidos mostram que a adição da areia de RCD resultou em redução na resistência à compressão axial aos 28 dias nos traços de RCC1, RCC2, RCC3 e RCC4, quando comparado com a resistência mecânica da argamassa de referência convencional: 42,54% para RCC1 com RDC; 40,19% para RCC2 com RDC e acréscimo de borracha; 49,26% para RCC3 com RDC e acréscimo de argila expandida; e, 52,67% para RCC1 com RDC e acréscimo de aditivo incorporador de ar. Observa-se também o aumento da relação água/cimento para viabilizar a consistência adequada das argamassas.

Destaca-se que a maior queda de resistência à compressão axial de 40,19% para a argamassa contendo areia de RCD e raspas de borracha pneu (RCC 2) em relação a argamassa convencional. No entanto, mesmo com a redução observada todos os traços contendo a presença da areia de RCD apresentaram uma resistência à compressão acima de 8 MPa, aos 28 dias de envelhecimento, validando a sua utilização como argamassas de revestimento do tipo III para contrapiso conforme definido na NBR 13281 (2005), no Caderno de Encargo da editora PINI (1987) na composição de serviços de argamassa para contrapiso e também nas especificações técnicas de argamassas prontas comerciais encontradas no mercado.

A queda na resistência mecânica das misturas contendo a areia de RCD corrobora com pesquisas anteriores (LEITE, 2001; POON, 2004; EVANGELISTA; BRITO, 2007; CORINALDESI, 2009; MALTA, SILVA e GONÇALVES, 2013; CARASEK *et al.*, 2018; SENA e MORCELLI, 2018) e pode ser explicada ao levarmos em conta o teor de finos, granulometria e a absorção desse material em comparação com os traços utilizando-se somente da areia média natural. O elevado teor de finos aumenta a absorção de água demandando mais desse material para a produção de uma mistura trabalhável o que, conseqüentemente, aumenta a sua porosidade.

4.3 Análise do desempenho acústico dos sistemas de contrapiso

Para realização da análise acústica dos diferentes sistemas de contrapiso ensaiados na presente pesquisa foram tomados como base de comparação os dados de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) definidos pela NBR 15575 (2021) apresentados na Tabela 22.

Tabela 22– Critério para análise do nível de pressão de impacto sonoro normalizado.

Elemento	L'_n (dB)
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos.	≤ 80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas.	≤ 55

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Na Tabela 23 estão discriminados os níveis de pressão sonora de impacto ponderados ($L'_{n,w}$) definidos pela NBR 15575 (2021) considerando os padrões mínimo, intermediário e superior de desempenho.

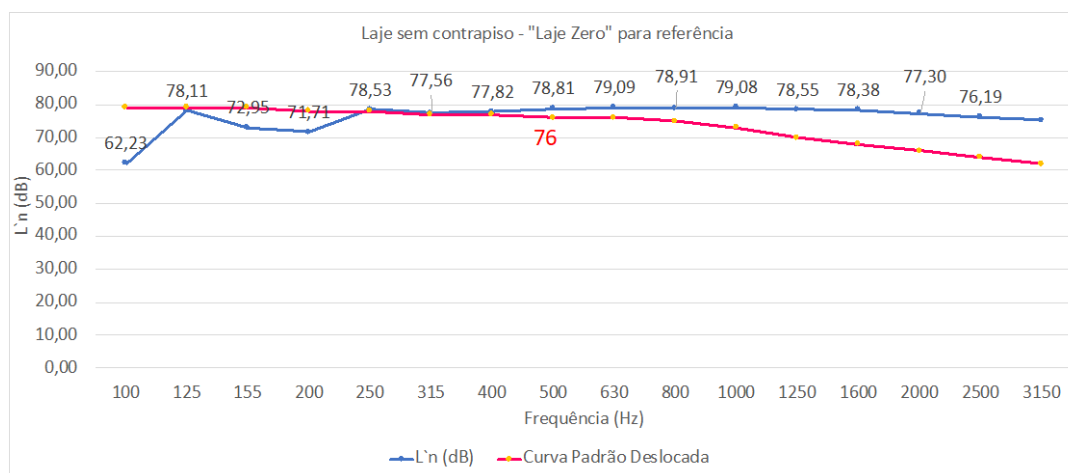
Tabela 23 – Valores de referência de critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado, $L'_{n,w}$.

Elemento	$L'_{n,w}$ (dB)	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos.	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas.	51 a 55	Mínimo
	46 a 50	Intermediário
	≤ 45	Superior

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021).

Previamente a realização dos ensaios nas placas de contrapiso, o nível de pressão de impacto sonoro (L'_n) foi detectado, para as frequências de 100 a 3150 Hz, para a laje maciça sem presença de contrapiso. Os resultados foram analisados por meio de uma linguagem de programação “R” através da qual obteve-se um valor absoluto e uma curva padrão deslocada para a laje de referência, conforme Figura 53.

Figura 53 – Nível de pressão de impacto sonoro normalizado (L'_n) para a laje sem contrapiso, em decibels (dB).

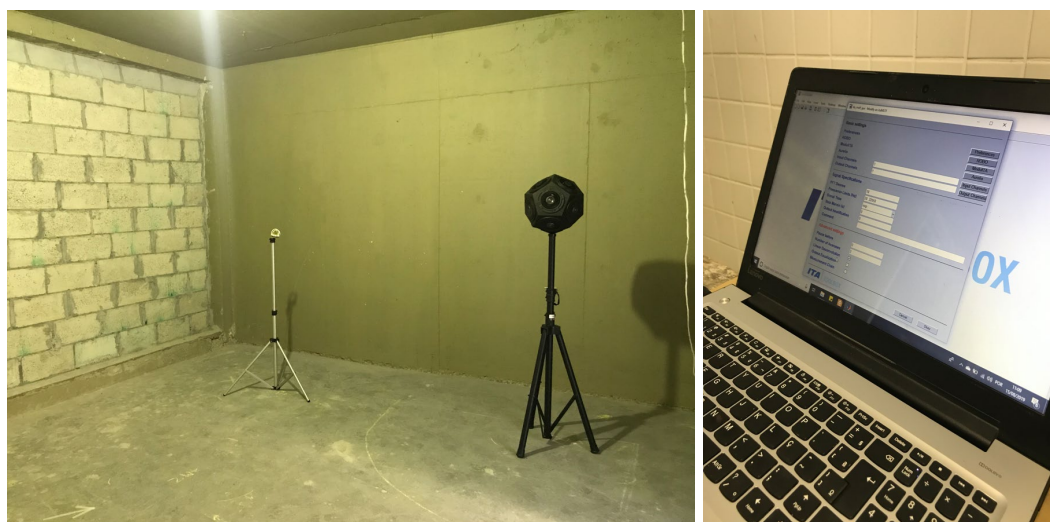


Os valores obtidos para a laje sem contrapiso atendem a definição da NBR 15575 – 3 (2021) no que diz respeito a sistemas de piso que separam unidades habitacionais autônomas que estão posicionadas em pavimentos distintos, ou seja, são menores do que 80 dB (Tabela 22), classificando-se no intervalo de desempenho mínimo, entre 66 a 80 dB (Tabela 23). No entanto, em relação a definição para áreas de uso coletivo que estejam sobre unidades habitacionais autônomas, a laje maciça ultrapassa o máximo de 55 dB definido pela normativa.

Essa observação evidencia a necessidade de um sistema de acabamento contendo capa de contrapiso e, possivelmente, revestimento superficial, nas unidades habitacionais com intuito de reduzir os níveis de ruído de impacto e trazer conforto acústico aos usuários de tal empreendimento.

Na Tabela 24 e na Figura 55, estão apresentados os valores medidos para o Tempo de Reverberação (TR) no momento de realização dos ensaios (Figura 54) para as diferentes misturas de contrapiso (Convencional, RCC1, RCC2, RCC3 e RCC 4) dentro da faixa de frequência de interesse (100 a 3150 Hz). Sendo que os valores foram adequados para obtenção dos dados de tempo de reverberação final, em segundos, os quais foram posteriormente aplicados para obtenção dos níveis de pressão sonora de impacto normalizados conforme Fórmula 1, sendo aplicados como os valores de “T”, em segundos.

Figura 54 – Ensaio do Tempo de Reverberação



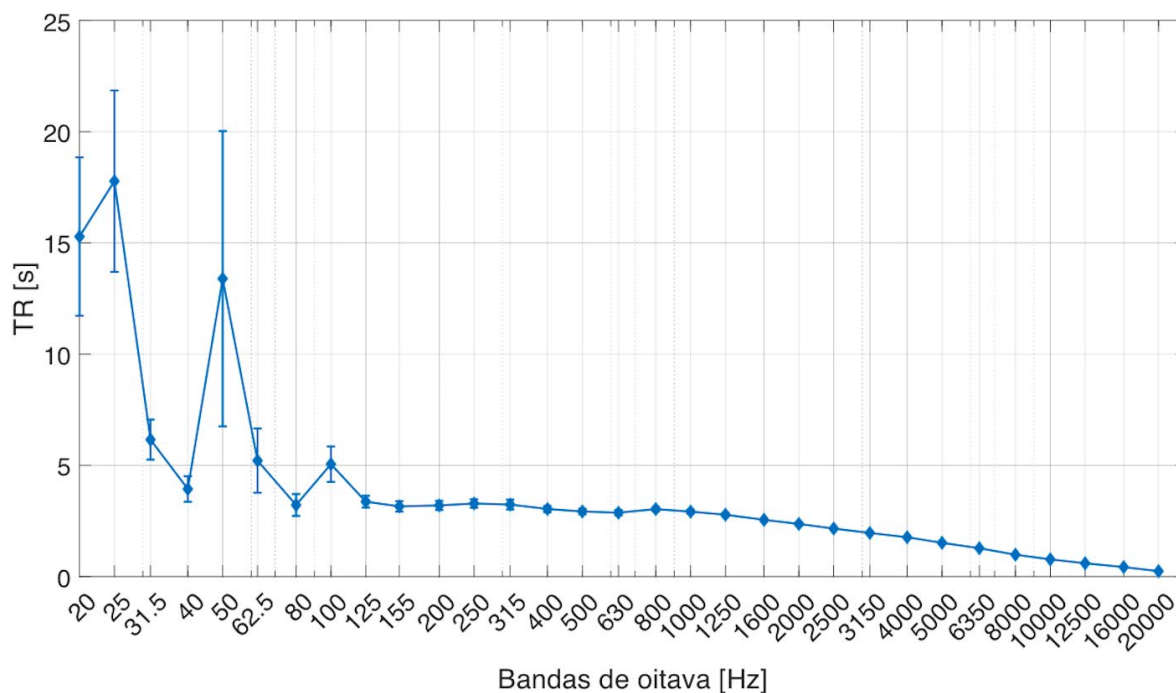
Fonte: A autora (2022).

Tabela 24 – Adequação para obtenção do tempo de reverberação (T), em segundos.

Frequência (Hz)	100	125	155	200	250	315	400	500
T20 (s)	5,358	3,386	3,036	3,239	3,268	3,441	2,897	2,897
Incerteza (s)	1,070	0,265	0,239	0,210	0,226	0,212	0,139	0,124
A0 (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
Frequência (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
T20 (s)	2,900	2,893	2,776	2,543	2,462	2,236	1,996	1,801
Incerteza (s)	0,111	0,100	0,086	0,075	0,070	0,063	0,052	0,043
A0 (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065

Fonte: A autora (2022)

Figura 55 – Gráfico do Tempo de Reverberação



Fonte: A autora (2022).

As medições de nível de pressão de impacto sonoro foram realizadas para as diferentes misturas de contrapiso e a Tabela 25 apresenta os valores obtidos experimentalmente (L_i) na sala receptora, em decibels (dB), já unificados através de uma média logarítmica.

Tabela 25 – Valores de nível de pressão (L_i), em decibels (dB), captados pelo analisador de frequências.

Frequência (Hz)	100	125	155	200	250	315	400	500
Convencional	50,58	67,14	68,08	68,18	61,54	61,41	58,76	63,09
RCC 1 (RCD)	58,41	63,43	67,78	66,58	63,15	57,4	64,81	62,57
RCC 2 (borracha)	52,32	72,17	69,54	64,71	70,74	60,84	67,77	64,18
RCC 3 (argila)	54,01	65,18	67,58	65,62	65,54	56,55	66,1	61,58
RCC 4 (ar)	61,58	68,51	67,69	67,84	68,07	58,45	68,02	64,32
Frequência (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Convencional	58,94	54,63	55,22	49,31	47,67	43,28	44,33	44,82
RCC 1 (RCD)	53,76	59,01	52,81	49,82	45,54	42,48	37,56	40,09
RCC 2 (borracha)	54,92	57,07	51,35	50,92	45,77	43,43	41,52	43,84
RCC 3 (argila)	54,27	58,65	53,28	49,08	43,87	40,69	42,85	39,55
RCC 4 (ar)	56,19	59,07	53,33	51,34	45,99	42,57	38,23	36,21

Fonte: A autora (2022).

Na sequência, os valores de tempo de reverberação em segundos (Tabela 24) foram utilizados para parametrizar os valores de nível de pressão de impacto sonoro (L_i) obtidos no ensaio (Tabela 25), visando a obtenção dos níveis de pressão de impacto sonoro normalizados (L'_n), os quais estão descritos na Tabela 26.

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.

Tabela 26 – Valores de nível de pressão (L_i) captados na sala receptora ajustados com o tempo de reverberação (T) para obtenção dos níveis de pressão normalizados (L'_n) em decibels (dB).

Frequência (Hz)		100	125	155	200	250	315	400	500
Convencional	L_i (dB)	50,58	67,14	68,08	68,18	61,54	61,41	58,76	63,09
	T (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
	L'_n (dB)	42,89	61,5	62,86	62,68	56,00	55,65	53,75	58,07
RCC 1 (RCD)	L_i (dB)	58,41	63,43	67,78	66,58	63,15	57,4	64,81	62,57
	T (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
	L'_n (dB)	50,73	57,73	62,56	61,07	57,61	51,63	59,79	57,56
RCC 2 (borracha)	L_i (dB)	52,32	72,17	69,54	64,71	70,74	60,84	67,77	64,18
	T (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
	L'_n (dB)	45,63	66,48	64,32	59,20	65,20	55,08	62,75	59,17
RCC 3 (argila)	L_i (dB)	54,01	65,18	67,58	65,62	65,54	56,55	66,1	61,58
	T (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
	L'_n (dB)	46,32	59,48	62,35	60,12	60,00	50,79	61,09	56,56
RCC 4 (ar)	L_i (dB)	61,58	68,51	67,69	67,84	68,07	58,45	68,02	64,32
	T (s)	1,703	2,694	3,005	2,817	2,792	2,652	3,150	3,149
	L'_n (dB)	53,90	62,82	62,46	62,34	62,53	52,68	63,00	59,30
Frequência (Hz)		630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Convencional	L_i (dB)	58,94	54,63	55,22	49,31	47,67	43,28	44,33	44,82
	T (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065
	L'_n (dB)	53,92	49,62	50,38	44,86	43,36	39,39	40,93	41,87
RCC 1 (RCD)	L_i (dB)	53,76	59,01	52,81	49,82	45,54	42,48	37,56	40,09
	T (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065
	L'_n (dB)	48,73	54,00	47,97	45,37	41,23	38,58	34,16	37,14
RCC 2 (borracha)	L_i (dB)	54,92	57,07	51,35	50,92	45,77	43,43	41,52	43,84
	T (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065
	L'_n (dB)	49,00	52,06	46,52	46,47	41,45	39,54	38,12	40,89
RCC 3 (argila)	L_i (dB)	54,27	58,65	53,28	49,08	43,87	40,69	42,85	39,55
	T (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065
	L'_n (dB)	49,25	53,64	48,45	44,63	39,56	36,79	39,45	36,59
RCC 4 (ar)	L_i (dB)	56,19	59,07	53,33	51,34	45,99	42,57	38,23	36,21
	T (s)	3,146	3,154	3,287	3,589	3,706	4,080	4,571	5,065
	L'_n (dB)	51,17	54,06	48,50	46,89	41,68	38,68	34,83	33,25

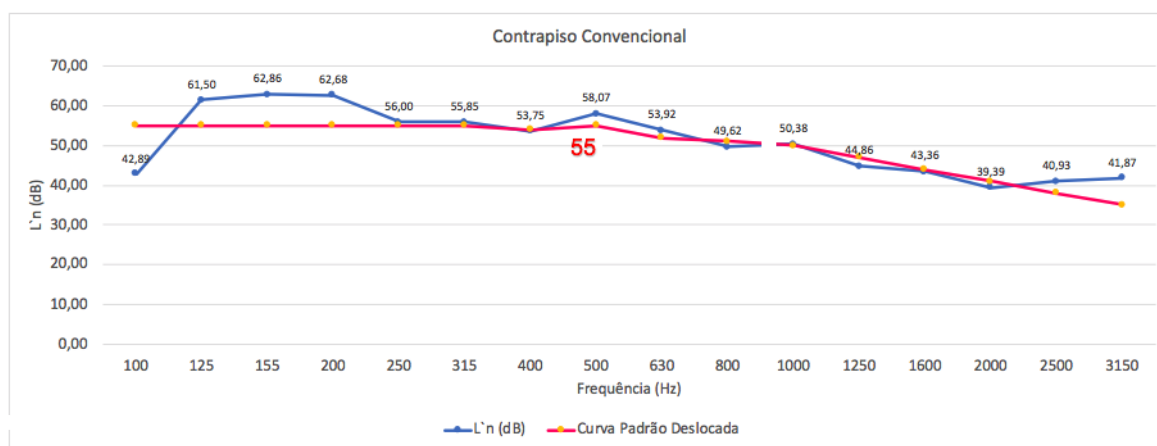
Fonte: A autora (2022).

Para fins de comparação entre os tipos de contrapiso e os limites definidos na NBR 15575 (2021), utilizou-se a linguagem de programação “R”, que permitiu a extração de um valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto normalizado ($L'_{n,w}$) para cada tipo de contrapiso ensaiado.

Além disso, esse método de análise proporcionou a montagem de gráficos com uma curva padrão deslocada para cada mistura de argamassa, ao longo do trecho de frequência de interesse (100 a 3150 Hz), em concordância com a ISO 10140 (2021). A normativa especifica que os deslocamentos da curva padrão sejam realizados em incrementos de 1 dB em direção à curva medida até que a soma dos desvios não favoráveis fosse tão grande, porém menor do que 32 dB.

Na Figura 56 estão apresentados os dados de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) para o contrapiso convencional, contendo apenas areia média natural, bem como sua curva padrão deslocada.

Figura 56 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional, em decibels (dB).

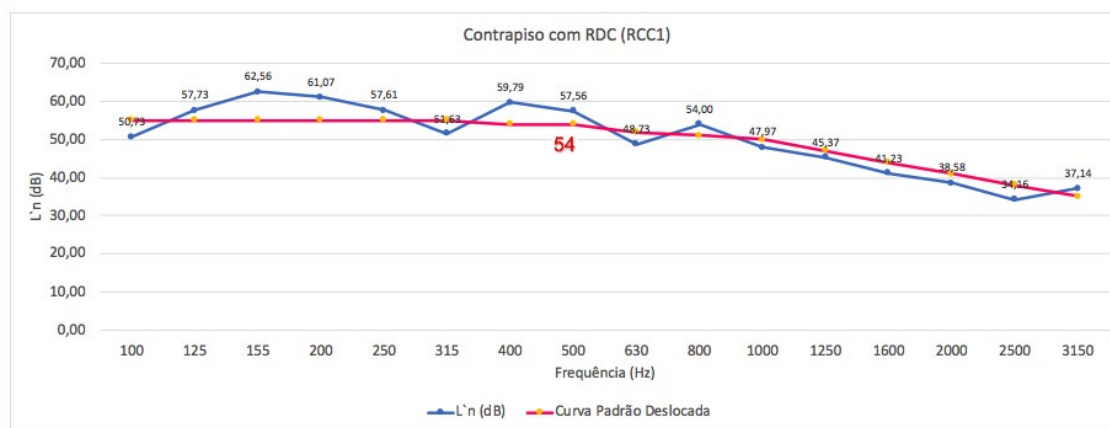


Fonte: A autora (2022).

Conforme observado na Figura 56, a curva padrão obtida para o contrapiso convencional apresentou um valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto ($L'_{n,w}$) de 55 dB e uma melhora gradativa a medida que o intervalo de frequências foi aumentando. Esse resultado classifica o contrapiso como um sistema de desempenho acústico superior para unidades habitacionais posicionadas em pavimentos distintos e com desempenho mínimo para áreas de uso coletivo, segundo a NBR 15575 – 3 (2021). O perfil descendente da curva padrão apareceu a partir da frequência de 500 Hz e seguiu até a última frequência analisada (3150 Hz), sendo que a medida que a frequência aumenta o ruído fica mais estridente e desconfortável ao usuário (DELAZERI, 2021).

Na Figura 57 estão dispostos os resultados de nível de pressão sonora de impacto normalizado (L'_n) e a curva padrão deslocada para o contrapiso contendo areia média natural e areia de RCD (RCC 1).

Figura 57- Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso contendo RCD (RCC1), em decibels (dB).



Fonte: A autora (2022).

O valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto ($L'_{n,w}$) para o contrapiso contendo areia de RCD (RCC 1) foi de 54 dB e o perfil descendente da curva padrão iniciou-se já a partir da frequência de 315 Hz, antes do observado no agregado convencional. Mesmo que com diferença de apenas 1 dB na curva padrão em comparação ao contrapiso convencional, o contrapiso com RCD apresentou a maior diferença observada no ensaio analisando os dois materiais na frequência de 2500 Hz, chegando a 6,77 dB.

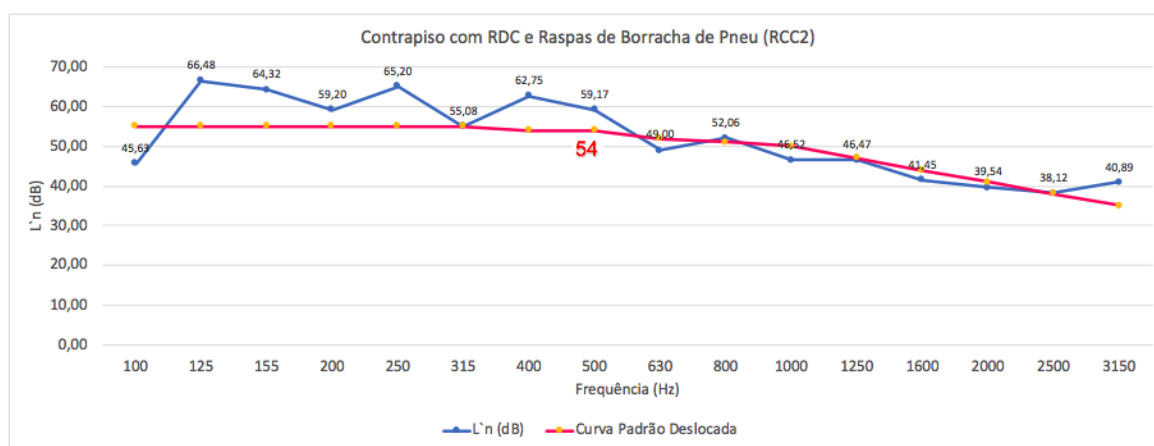
Logo, o contrapiso com adição de areia de RCD apresentou um isolamento acústico de ruído de impacto melhor em comparação ao contrapiso convencional, com agregado natural, e classifica-se similarmente a este: com desempenho mínimo em áreas coletivas e desempenho superior em unidades habitacionais separadas por pavimentos distintos (NBR 15575 – 3, 2021).

O desempenho acústico do contrapiso com RCD invalida então o preconceito quanto ao agregado oriundo dos rejeitos da construção civil, demonstrando que este tem viabilidade para confecção de argamassas de contrapiso e possui características acústicas análogas, inclusive com resultados superiores em alguns traços, que as do contrapiso com agregado convencional. Amarilla (2019), de forma similar a presente pesquisa, detectou redução de impacto

sonoro em peças confeccionadas com resíduos de construção e demolição confirmando que a utilização do RCD é uma alternativa sustentável para mitigação de impacto sonoro e ambiental, simultaneamente.

Na Figura 58 são exibidos os valores de nível de pressão sonora de impacto (L'_n) e a curva padrão deslocada para o contrapiso contendo areia média natural, areia de RCD e raspas de borracha de pneu (RCC 2).

Figura 58 - Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso contendo raspas de borracha de pneu (RCC2), em decibels (dB).



Fonte: A autora (2022).

O contrapiso contendo as raspas de borracha de pneu (RCC 2) apresentou um valor absoluto de 54 dB, valor igual ao obtido para o contrapiso com areia de RCD (RCC 1), no entanto ao observar os dados de nível de pressão sonora para cada frequência foram ligeiramente mais elevados em relação ao contrapiso contendo apenas RCD, fato este que pode ser explicado pela diferença proporção de RCD de apenas 50%, para viabilizar a inserção das raspas de borracha na argamassa.

Em comparação com o contrapiso convencional, houve uma melhora no desempenho acústico do contrapiso com a adição das raspas de borracha de pneu e a maior diferença entre os dois ocorreu na frequência de 2500 Hz com 1,81 dB.

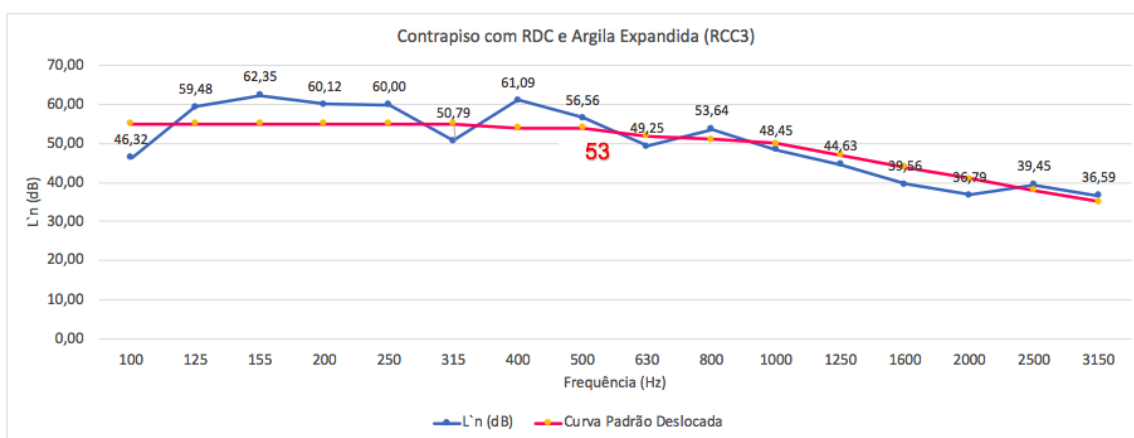
Esse efeito pode ser explicado devido a redução da rigidez e deformação da argamassa trazida pela presença da borracha, o que proporciona uma atenuação na passagem de ruído na camada analisada (CANOVA, BERGAMASCO, NETO, 2007; FURLANETTO NETO, CASTRO, 2012; KNABBEN, 2012). Em soma a isso, Fraile-Garcia *et al.* (2016) enfatizam que essa redução de ruído e ao mesmo tempo com

valores próximos ao contrapiso convencional ocorrem pela interface gerada entre a argamassa e a borracha, na qual a falta de interconexão entre os materiais acaba suavizando levemente a passagem de ruídos.

Sendo assim, a adição de raspas de pneu em misturas cimentícias apresenta uma possibilidade de aplicação com intuito de melhorar diferentes características desses materiais e dar finalidade a um resíduo produzido em alto volume diariamente (Neto e Castro, 2011; Fraile-Garcia *et al.*, 2016).

Na Figura 59 estão apresentados os resultados de nível de pressão sonora de impacto (L'_n) bem como a curva padrão deslocada para o contrapiso com areia média natural, areia de RCD e argila expandida (RCC 3).

Figura 59 - Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso contendo argila expandida (RCC3), em decibels (dB).



Fonte: A autora (2022).

Por meio dos valores obtidos, observou-se que o valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto foi de 53 dB. Em relação as argamassas de contrapiso analisadas nessa fase, o contrapiso contendo a adição de argila expandida apresentou o melhor isolamento acústico ao ruído de impacto.

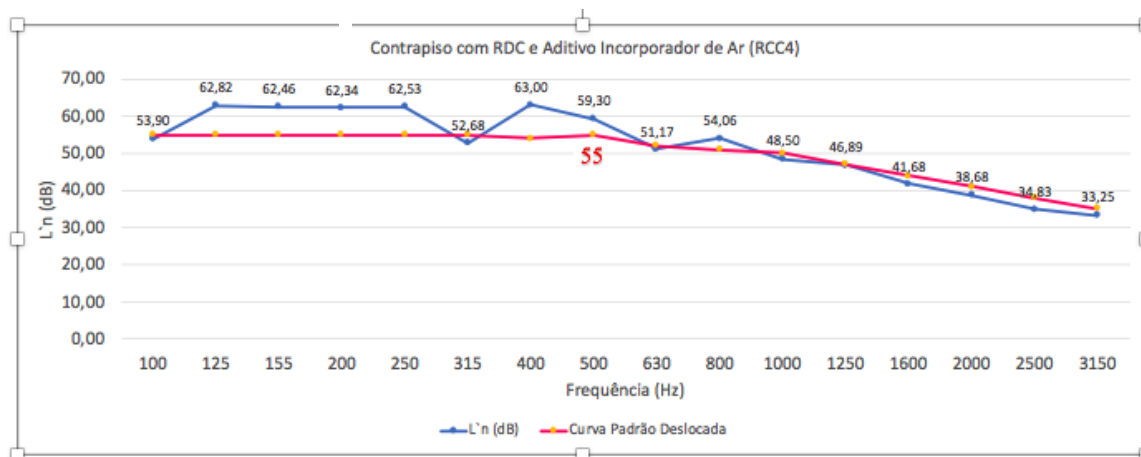
Esse comportamento corrobora com outros autores que observaram que a adição de agregados leves em misturas cimentícias potencializa seu desempenho acústico na aplicação de contrapisos e confirma que materiais com menor massa específica, fisicamente duros e lisos otimizam essa característica (BORGES, 2015; ZUCHETTO *et al.*, 2015; FUHR, 2016).

É possível ainda fazer um paralelo com o observado por Branco e Godinho (2013), onde os autores observaram melhora no desempenho acústico das misturas

de argamassa contendo cortiça expandida e poliestireno a partir da frequência de 315 Hz. Esse efeito foi obtido para o contrapiso com argila expandida (RCC 3) no presente trabalho, chegando em uma diferença máxima de 2,51 dB na frequência de 2000 Hz em relação ao contrapiso convencional.

Finalizando a primeira etapa de análise acústica dos contrapisos, na Figura 60 estão dispostos os valores de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) para o contrapiso contendo areia média natural, areia de RCD e incorporador de ar (RCC 4), em conjunto com a curva padrão deslocada com o valor absoluto obtido após análise estatística.

Figura 60- Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso contendo incorporador de ar (RCC4), em decibels (dB).



Fonte: A autora (2022).

O valor absoluto obtido para o contrapiso contendo incorporador de ar (RCC 4) foi de 55 dB, o mesmo encontrado para o contrapiso convencional, contendo areia média natural. Mesmo com essa similaridade, nas frequências mais altas o contrapiso com incorporador de ar apresentou uma redução nos níveis de pressão sonora de impacto, chegando a uma diferença de 8,62 dB na frequência de 3150 Hz.

Esse efeito pode ser explicado pela alta porosidade gerada na argamassa pela ação do aditivo incorporador de ar o que aumenta a atenuação dos ruídos em altas frequências (KNABBEN, 2012). Porém, mesmo com alto volume de vazios na matriz, a sua intercomunicação não ocorre, as bolhas formadas são independentes, e esta conexão seria essencial para melhorar a dispersão dos ruídos de impacto e, conseqüentemente, o desempenho acústico do material cimentício (KNABBEN,

2012; TRENTIN *et al.*, 2020), explicando a proximidade da curva padrão do contrapiso com incorporador de ar em relação ao contrapiso convencional.

Conclui-se na primeira análise do desempenho acústico dos contrapisos ensaiados que todos melhoraram acusticamente em relação à laje sem contrapiso, utilizada como referência padrão, e possuem a mesma classificação segundo a NBR 15575 (2021): com desempenho acústico de nível superior para unidades habitacionais posicionadas em pavimentos distintos, menor ou igual a 55 dB, e nível mínimo para áreas de uso coletivo entre unidades habitacionais autônomas, entre 51 e 55 dB.

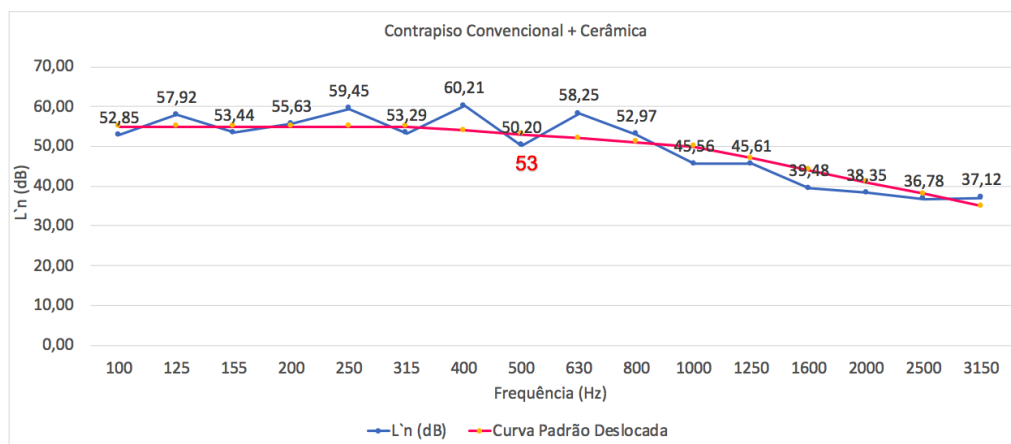
Em relação aos contrapisos contendo materiais provenientes de resíduos de construção ou de pneu (RCC 1 e RCC 2), estes apresentaram uma redução no nível de pressão sonora de impacto em relação ao contrapiso convencional e são uma alternativa viável tanto da perspectiva acústica quanto de sustentabilidade.

O contrapiso com melhor desempenho acústico ao ruído de impacto, considerando a análise estatística “R” que gerou um valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto, foi aquele contendo areia de RCD e argila expandida (RCC 3). Sendo que a redução na massa específica do material, bem como as suas características superficiais auxiliaram na otimização da propriedade acústica da argamassa, corroborando com o previamente observado por outras pesquisas (BORGES, 2015; ZUCHETTO *et al.*, 2015; FUHR, 2016).

A segunda etapa de análise de desempenho acústico de contrapisos ao ruído de impacto foi realizada após a montagem de contrapisos especiais contemplando os cinco traços (Convencional, RCC 1, RCC 2, RCC 3 e RCC 4) com aplicação dos seguintes revestimentos superficiais: cerâmico, porcelanato, laminado e vinílico.

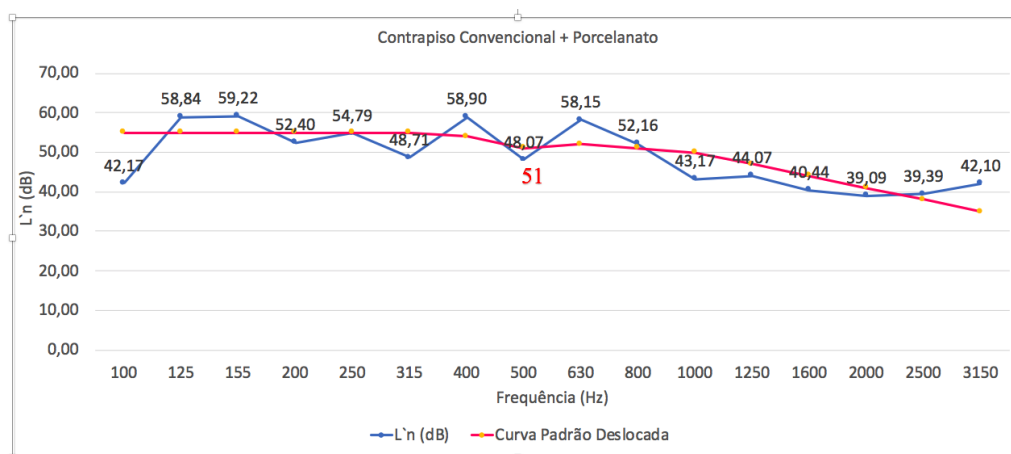
Nas Figuras 61, 62, 63, 64 e 65 estão apresentados os resultados de nível de pressão sonora de impacto normalizado (L'_n) e as curvas padrão deslocadas, em conformidade com a ISO 10140 (2021), para o contrapiso com areia média natural (Convencional) com os diferentes revestimentos analisados durante o presente trabalho.

Figura 61 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional contendo revestimentos superficiais de cerâmica



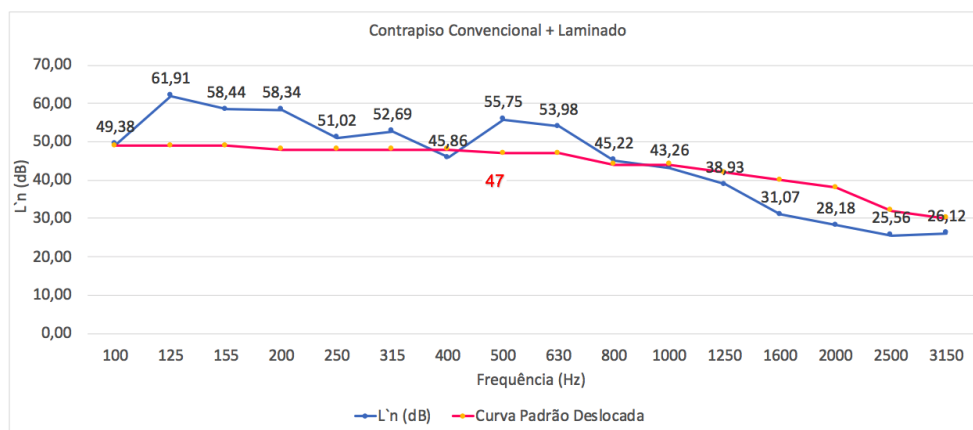
Fonte: A autora (2022).

Figura 62 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional contendo revestimentos superficiais de porcelanato



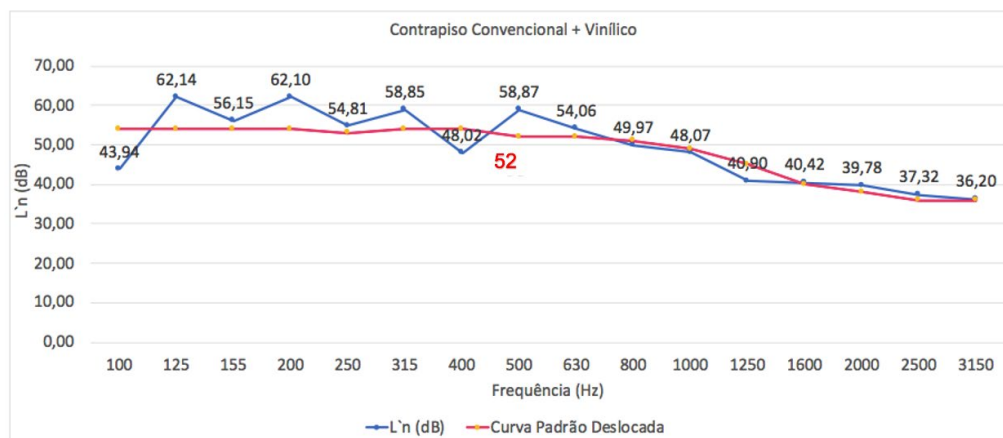
Fonte: A autora (2022).

Figura 63 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional contendo revestimentos superficiais de laminado de madeira



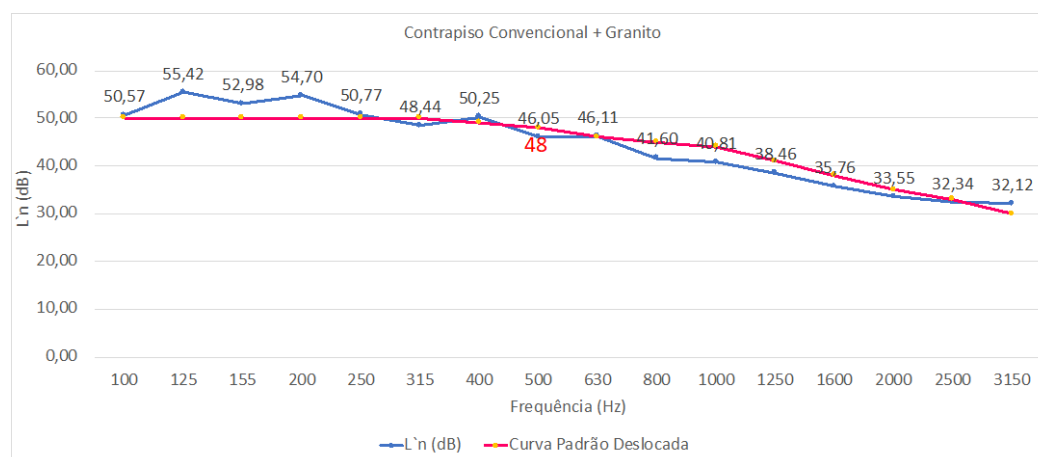
Fonte: A autora (2022).

Figura 64 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional contendo revestimentos superficiais de vinílico



Fonte: A autora (2022).

Figura 65 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso convencional contendo revestimentos superficiais de granito



Fonte: A autora (2022).

As curvas padrão dos contrapisos convencionais com revestimentos apresentaram um comportamento decrescente que se acentua a partir de 800 Hz, sendo que houve redução em todos os valores absolutos de nível de pressão em relação ao contrapiso convencional sem revestimento, com 55 dB. Segundo a classificação da NBR 15575 (2021) os contrapisos especiais com revestimento de cerâmica, porcelanato e piso vinílico tem nível mínimo e o contrapiso com revestimento de piso laminado tem nível acústico intermediário, considerando áreas de uso coletivo separadas de unidades habitacionais autônomas.

O contrapiso contendo revestimento de cerâmica foi o que apresentou a menor redução no nível de pressão sonora de impacto em comparação ao

contrapiso sem revestimento, corroborando com os resultados observados por Nunes, Zini e Pagnussat (2014) e Xavier, Melo e Ferreira (2020). Os materiais cerâmicos conferem maior rigidez ao sistema de contrapiso especiais em comparação com materiais como o piso laminado e, conseqüentemente, essa característica reduz o potencial de atenuação de ruído do sistema.

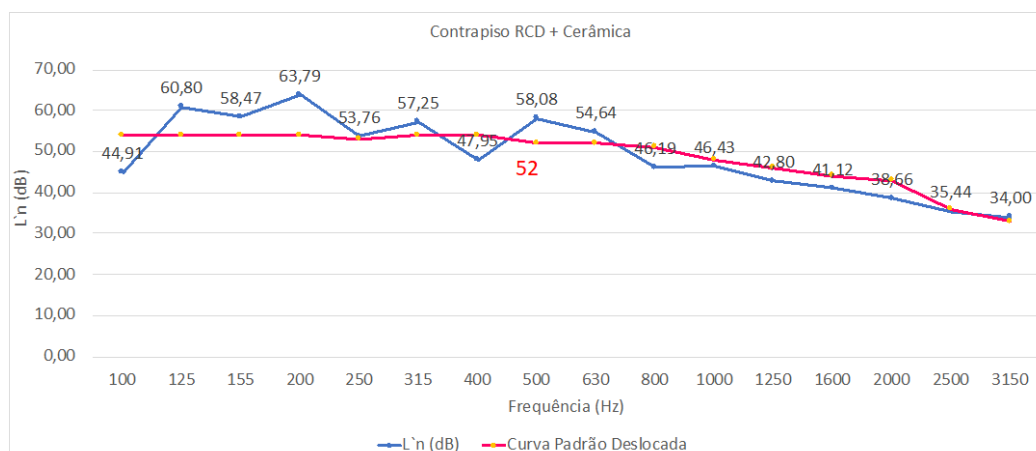
Apesar do revestimento de porcelanato possuir configuração cerâmica similar ao revestimento cerâmico este apresentou maior redução no nível de pressão em comparação ao primeiro, comportamento similar ao constatado por Pereyron (2008), Simões (2011), Beresford e Chen (2018) e Xavier, Melo e Ferreira (2020), que indicam que a espessura do revestimento superficial, menor do que a da placa cerâmica, e a massa específica adicionada ao sistema de contrapiso interferem para gerar tal resultado.

Os contrapisos contendo os pisos laminado e vinílico apresentaram comportamento similar ao longo das frequências de observação com redução a partir de 1000 Hz, sendo que o contrapiso com piso laminado foi que obteve a maior diferença de nível de pressão sonora de impacto em relação ao contrapiso sem revestimento com 8 dB. Essa diferença pode ser atribuída a maior massa superficial desse revestimento em comparação com outros sistemas de revestimento em madeira e pela não existência de vínculos rígidos com os demais elementos construtivos (NUNES, ZINI, PAGNASSUT, 2014; BERESFORD, CHEN, 2018).

Em estudo de Rossi (2020), a autora evidencia que a constituição, qualidade e especificação de uso dos pisos vinílicos tem relação direta com o desempenho acústico do material, o que pode ter influenciado no resultado do revestimento de piso vinílico analisado no presente trabalho.

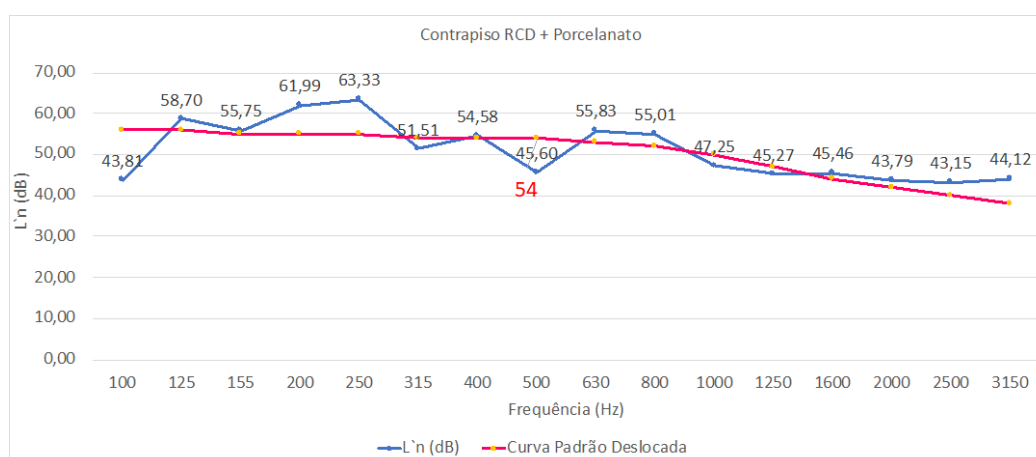
Nas Figuras 66, 67, 68, 69 e 70 estão expostos os resultados de nível de pressão sonora de impacto normalizado (L'_n) para o contrapiso com areia média natural e areia de RCD (RCC1), bem como as curvas padrão deslocadas para cada revestimento ensaiado.

Figura 66 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com RCD (RCC1) contendo revestimentos superficiais de cerâmica



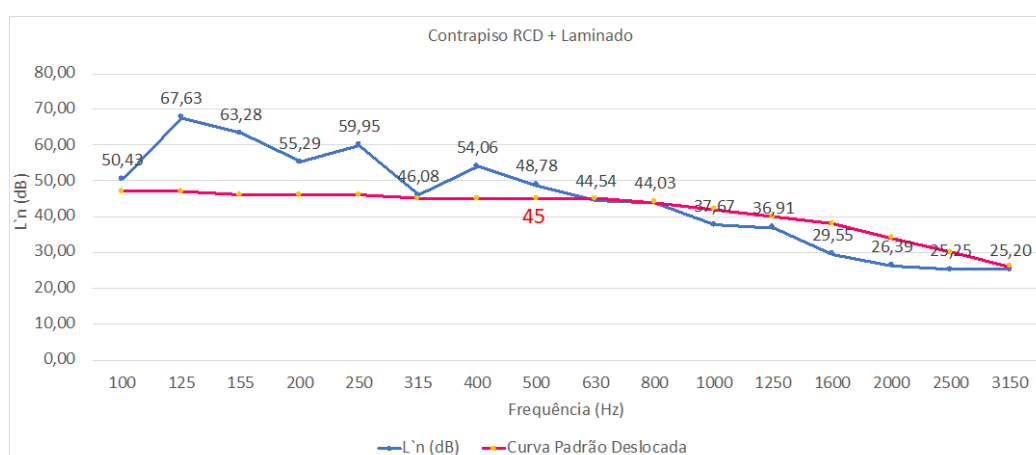
Fonte: A autora (2022).

Figura 67 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com RCD (RCC1) contendo revestimentos superficiais de porcelanato



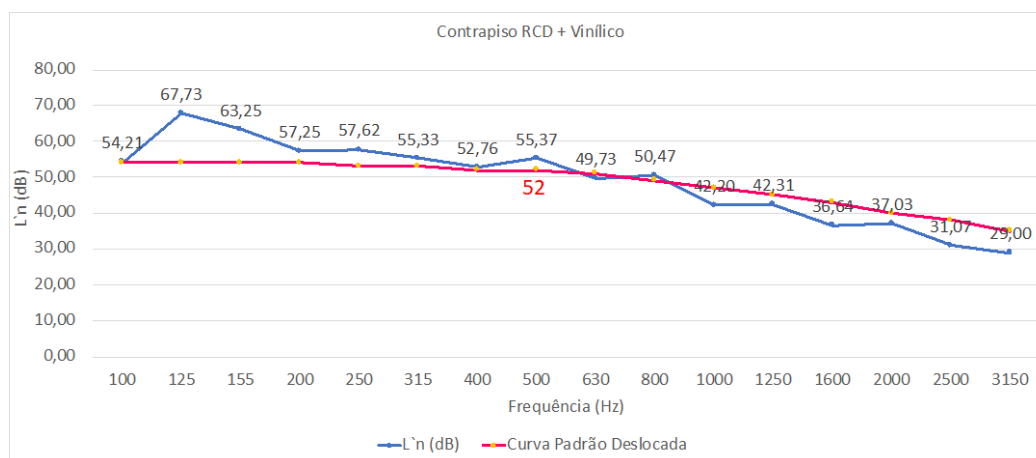
Fonte: A autora (2022).

Figura 68 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com RCD (RCC1) contendo revestimentos superficiais de laminado de madeira



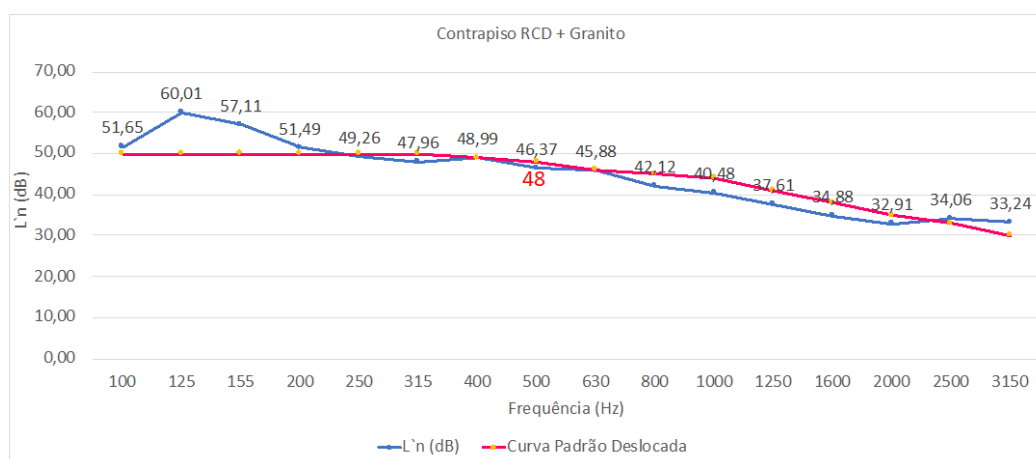
Fonte: A autora (2022).

Figura 69 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com RCD (RCC1) contendo revestimentos superficiais de vinílico



Fonte: A autora (2022).

Figura 70 – Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com RCD (RCC1) contendo revestimentos superficiais de granito



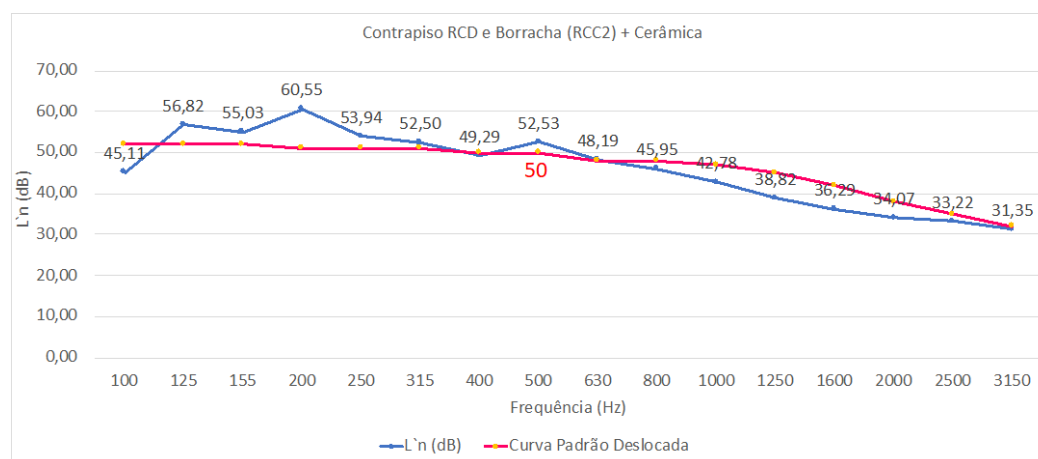
Fonte: A autora (2022).

Os contrapisos contendo os revestimentos de cerâmica, piso vinílico e piso laminado apresentaram redução no nível de pressão sonora de impacto em relação ao contrapiso sem revestimento contendo areia de RCD (RCC1). Já o revestimento com porcelanato manteve o comportamento acústico de valor absoluto em 54 dB. Similar ao observado nos resultados para contrapiso convencional, essa continuidade no revestimento de porcelanato pode ser decorrente da espessura final do sistema de contrapiso em conjunto com a variação na massa específica em comparação com o revestimento de cerâmica (PEREYRON, 2008; SIMÕES, 2011, BERESFORD E CHEN, 2018; XAVIER, MELO, FERREIRA, 2020).

Para os revestimentos de cerâmica e piso vinílico obteve-se o mesmo valor absoluto de nível de pressão sonora de impacto de 52 dB, porém os valores a partir da frequência de 1000 Hz foram menores para o piso vinílico com diferença de 5 dB à 3150 Hz. A maior redução foi observada para o revestimento de piso laminado com 9 dB de diferença em relação ao contrapiso sem revestimento, o que corrobora com o obtido para o contrapiso convencional com o mesmo revestimento e o coloca na classificação de desempenho acústico superior (≤ 45 dB) segundo a NBR 15575 – 3 (2021). Conclui-se com este resultado que o piso laminado proporciona uma atenuação de ruído de impacto eficaz em comparação com os outros revestimentos analisados e que a combinação desse sistema com o uso de agregados reciclados na argamassa de contrapiso é uma alternativa acusticamente viável e de fácil aplicação em sistemas de contrapiso sujeitas ao ruído de impacto.

Nas Figuras 71, 72, 73, 74 e 75 estão dispostos os valores de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) e as curvas padrão deslocadas para cada revestimento no contrapiso com areia natural média, areia de RCD e raspas de borracha de pneu (RCC2).

Figura 71– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com raspas de borracha de pneu (RCC2) contendo revestimentos superficiais de cerâmica



Fonte: A autora (2022).

Figura 72– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com raspas de borracha de pneu (RCC2) contendo revestimentos superficiais de porcelanato

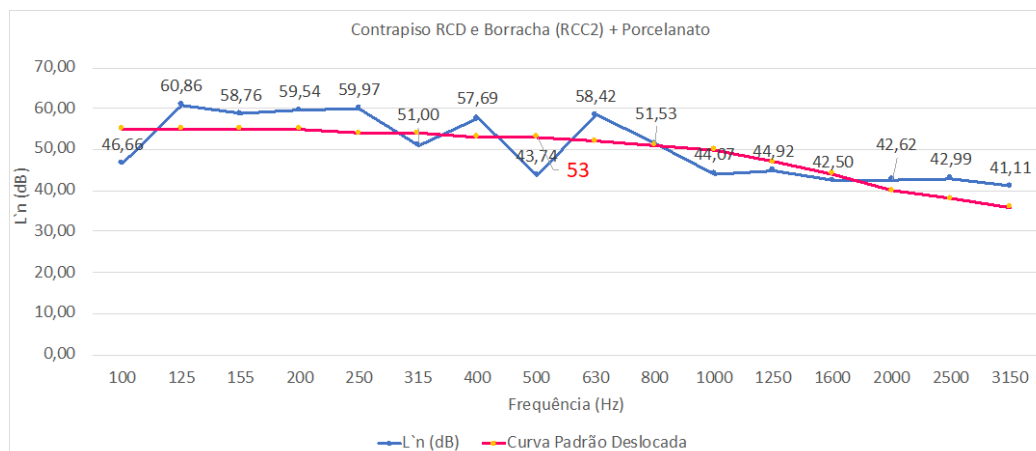


Figura 73– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com raspas de borracha de pneu (RCC2) contendo revestimentos superficiais de laminado de madeira

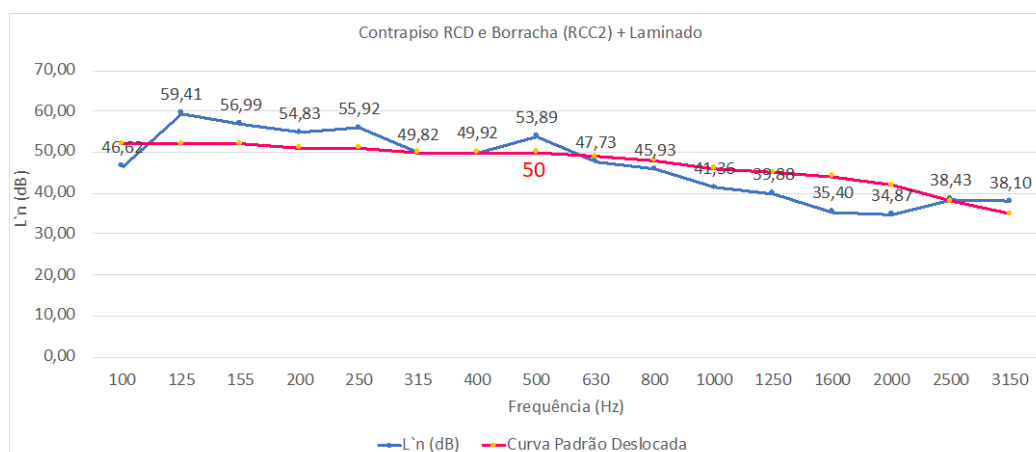


Figura 74– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com raspas de borracha de pneu (RCC2) contendo revestimentos superficiais de vinílico

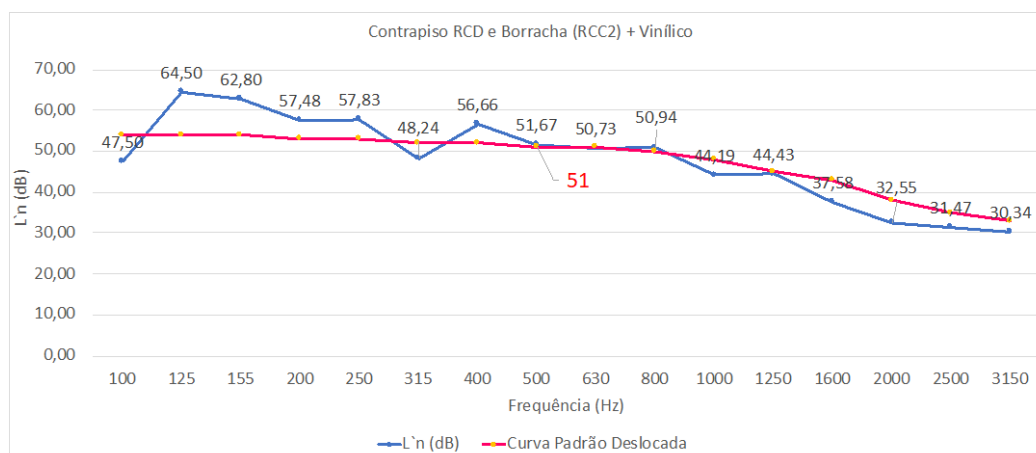
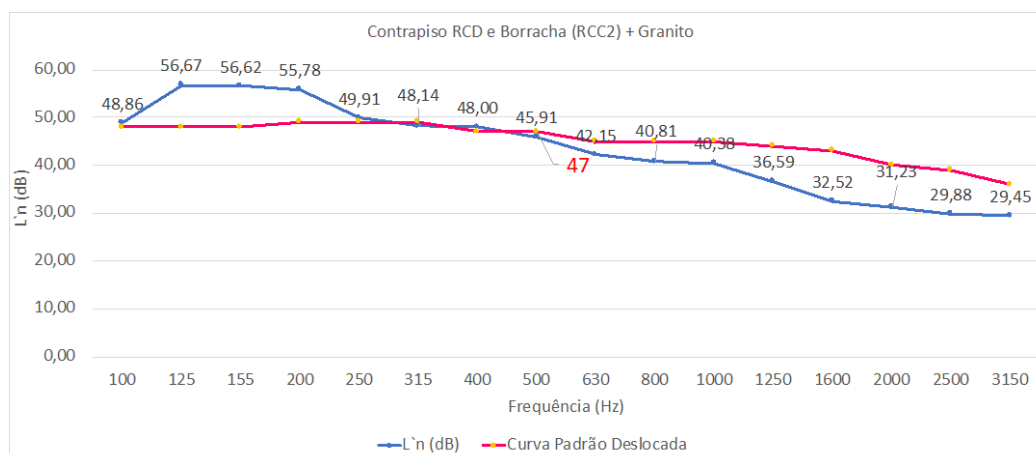


Figura 75– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com raspas de borracha de pneu (RCC2) contendo revestimentos superficiais de granito



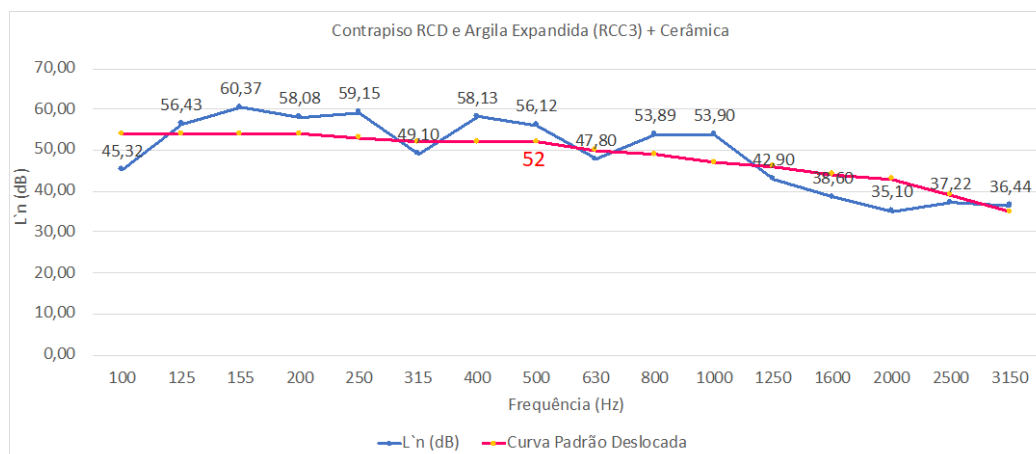
Fonte: A autora (2022).

Todos os contrapisos especiais com revestimento apresentaram redução no nível de pressão sonora de impacto absoluto em relação ao contrapiso com areia de RCD e raspas de borracha de pneu (RCC 2) sem revestimento que era de 54 dB. As maiores reduções observadas foram para os revestimentos de cerâmica e piso laminado com 4 dB de diferença, valores menos significativos em relação às variações observadas para o contrapiso convencional e aquele contendo areia de RCD. Essa mudança demonstra que a adição de borracha reduz a rigidez do sistema final atenuando o ruído de impacto (CANOVA, BERGAMASCO, NETO, 2007; FURLANETTO NETO, CASTRO, 2012; KNABBEN, 2012), efeito constatado principalmente na amostra com revestimento de cerâmica, mas ao mesmo tempo a pouca interconexão entre os materiais da argamassa resultam em uma atenuação mais leve em comparação com as demais argamassas, conforme apontado por Fraile-Garcia *et al.* (2016).

Além disso, enfatiza-se que novamente o revestimento de porcelanato foi o que apresentou o pior desempenho acústico ao comparar os diferentes revestimentos corroborando a informação já discutida previamente sobre a importância da espessura final do sistema de contrapiso (PEREYRON, 2008; SIMÕES, 2011, BERESFORD E CHEN, 2018; XAVIER, MELO, FERREIRA, 2020).

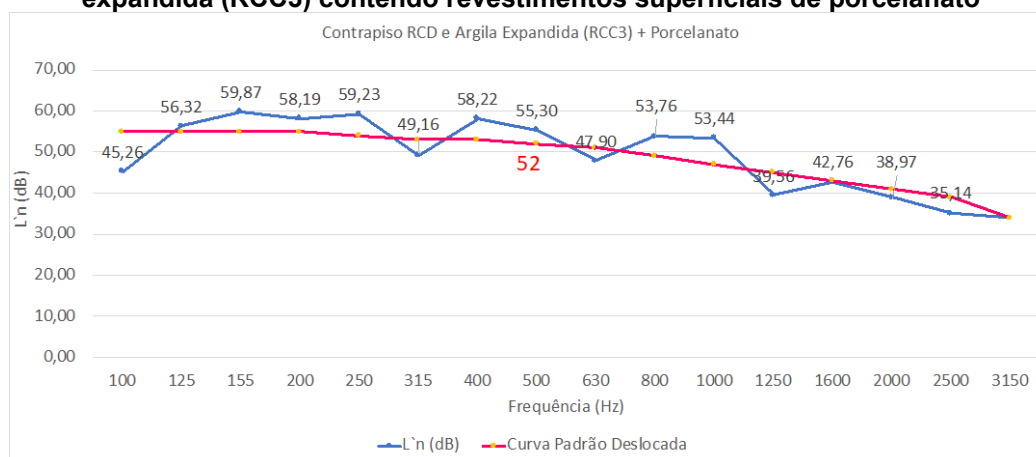
Nas Figuras 76, 77, 78, 79 e 80 estão apresentados os resultados de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) em conjunto com as curvas padrão deslocadas para o contrapiso contendo areia média natural, areia de RCD e argila expandida (RCC3) abrangendo os diferentes tipos de revestimentos analisados.

Figura 76– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com argila expandida (RCC3) contendo revestimentos superficiais de cerâmica



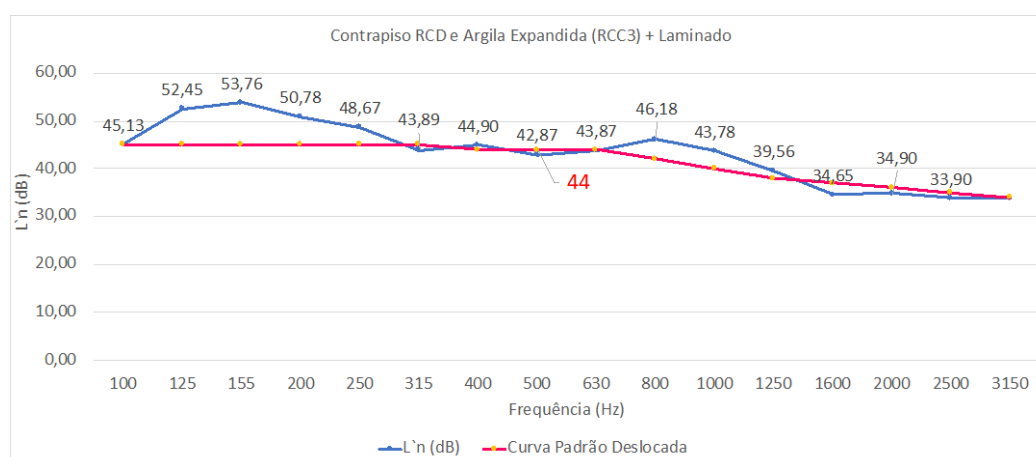
Fonte: A autora (2022).

Figura 77– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com argila expandida (RCC3) contendo revestimentos superficiais de porcelanato



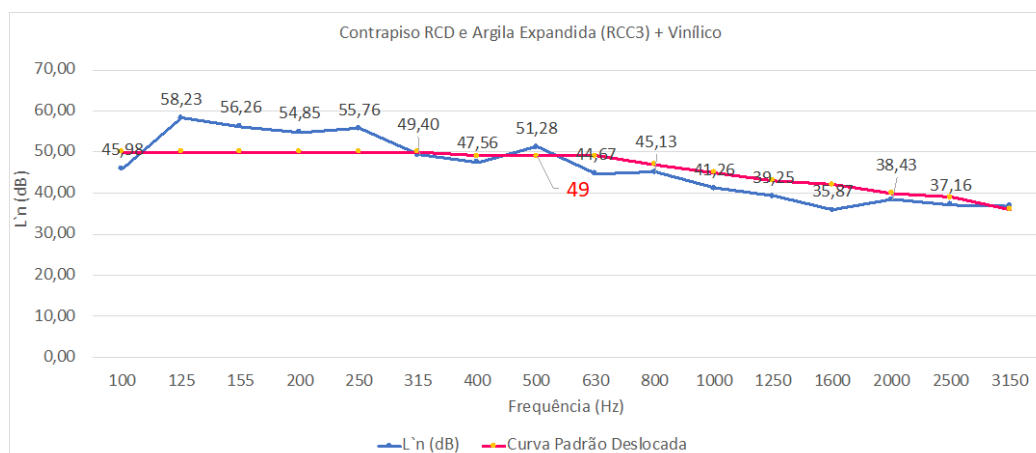
Fonte: A autora (2022).

Figura 78– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com argila expandida (RCC3) contendo revestimentos superficiais de laminado de madeira



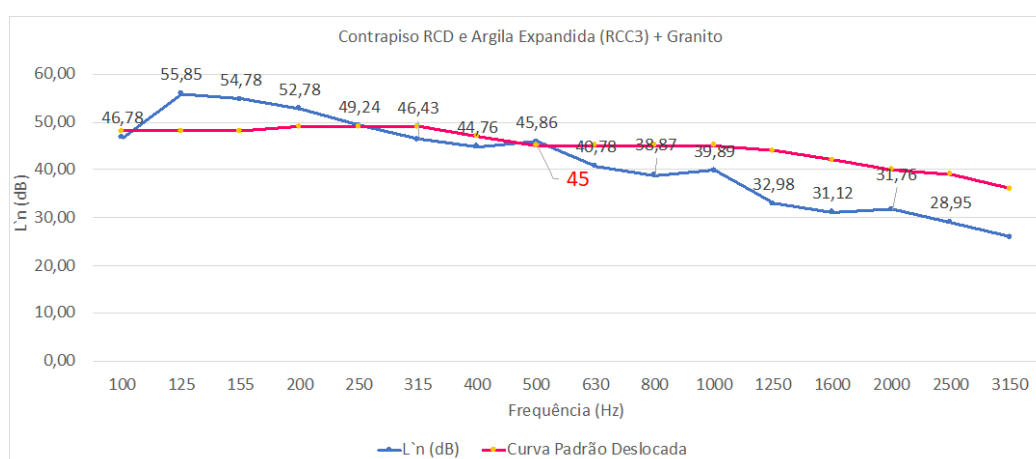
Fonte: A autora (2022).

Figura 79– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com argila expandida (RCC3) contendo revestimentos superficiais de vinílico



Fonte: A autora (2022).

Figura 80– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com argila expandida (RCC3) contendo revestimentos superficiais de granito



Fonte: A autora (2022).

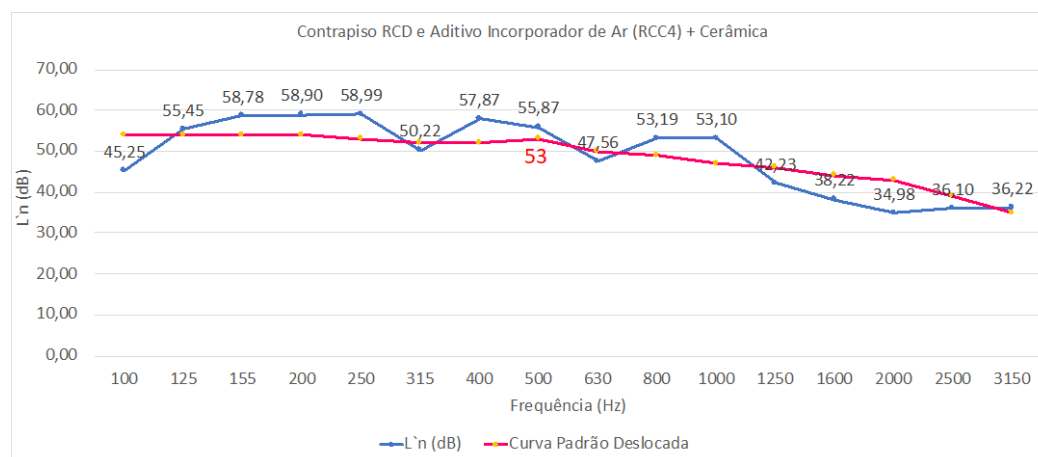
Todos os contrapisos especiais com areia de RCD e argila expandida (RCC 3) com revestimento apresentaram redução no nível de pressão sonora de impacto absoluto em relação ao contrapiso com a mesma composição, que era de 53 dB. Destaca-se aqui que o referido contrapiso com areia de RCD e acréscimo de argila expandida, foi a melhor composição para desempenho acústico em edificações. Ainda, ressalta-se que a maior redução observada foi para o revestimento de laminado de madeira e de revestimento de granito, com resultado de 44dB e 45 dB respectivamente, valores mais significativos em relação às variações observadas para o contrapiso convencional e aquele contendo somente areia de RCD, raspas de

borracha e aditivo incorporador de ar. Salieta-se que o resultado atingido o coloca na classificação de desempenho acústico superior (≤ 45 dB) segundo a NBR 15575 – 3 (2021). Esse fato pode se justificar, principalmente pela grande ligação da argila expandida juntamente com a pasta de cimento e areia da argamassa, formando um material com menor densidade aparente, conforme a Tabela 20, o que resulta em uma grande atenuação em comparação com as demais argamassas elaboradas nessa pesquisa. Para o contrapiso com areia de RCD e argila expandida (RCC 3) com revestimento vinílico, o mesmo é classificado com desempenho acústico intermediário, segundo a NBR 15575 (2021).

Além disso, enfatiza-se que novamente o revestimento de porcelanato foi o que apresentou o pior desempenho acústico ao comparar os diferentes revestimentos corroborando a informação já discutida previamente sobre a importância da espessura final do sistema de contrapiso (PEREYRON, 2008; SIMÕES, 2011, BERESFORD E CHEN, 2018; XAVIER, MELO, FERREIRA, 2020).

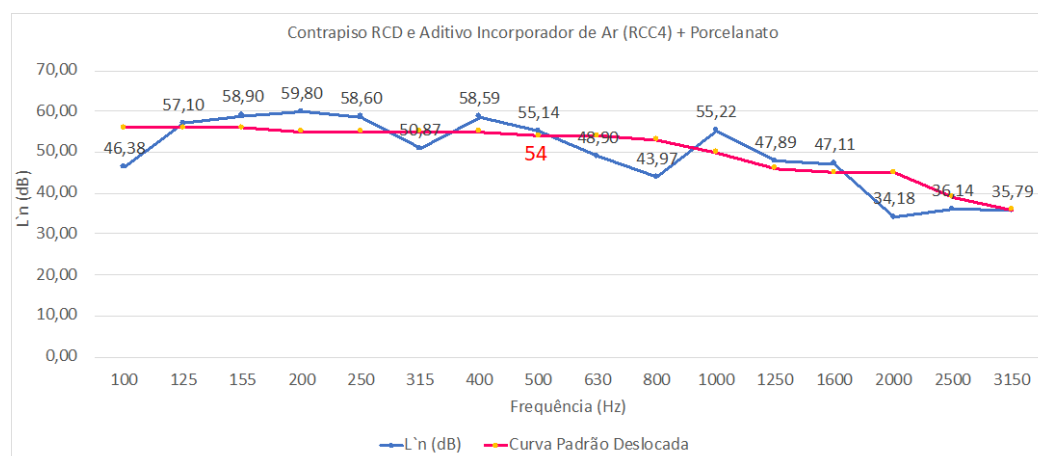
Finalizando as análises acústicas dos revestimentos, nas Figuras 81, 82, 83, 84 e 85 estão expostos os valores de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_n) e as curvas padrão deslocadas para cada tipo de revestimento para o contrapiso contendo areia média natural, areia de RCD e aditivo incorporador de ar (RCC4).

Figura 81– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com aditivo incorporador de ar (RCC4) contendo revestimentos superficiais de cerâmica



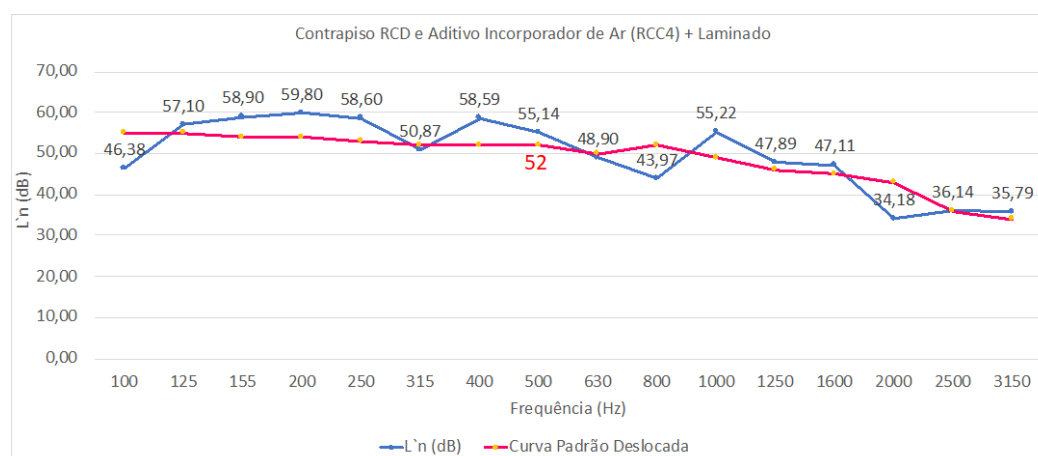
Fonte: A autora (2022).

Figura 82– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com aditivo incorporador de ar (RCC4) contendo revestimentos superficiais de porcelanato



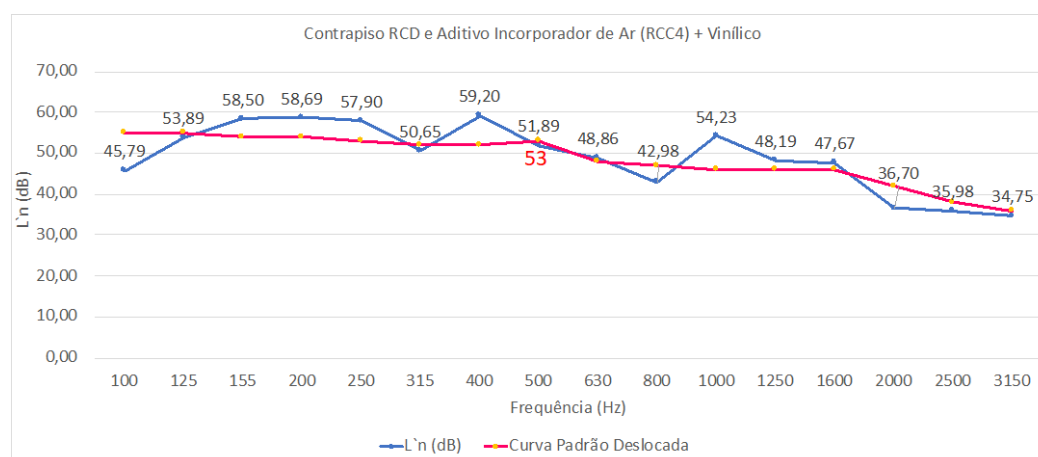
Fonte: A autora (2022).

Figura 83– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com aditivo incorporador de ar (RCC4) contendo revestimentos superficiais de laminado de madeira



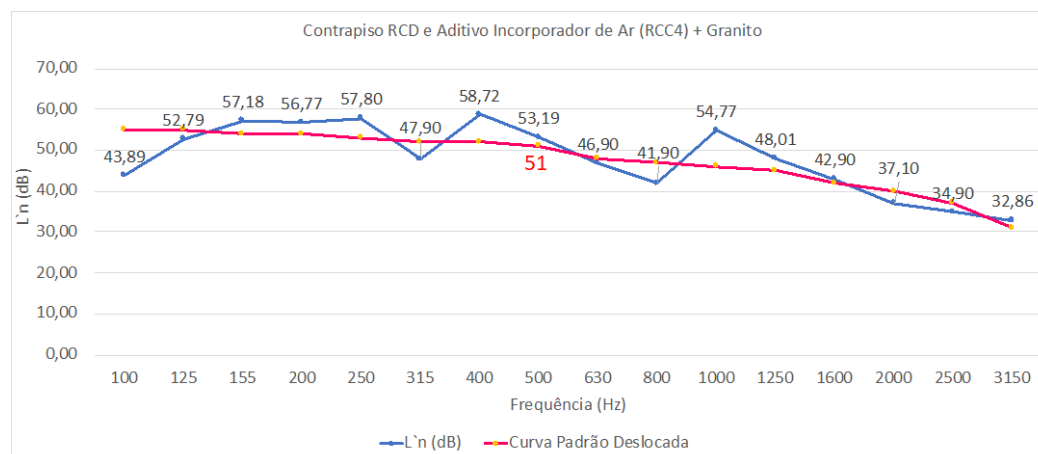
Fonte: A autora (2022).

Figura 84– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com aditivo incorporador de ar (RCC4) contendo revestimentos superficiais de vinílico



Fonte: A autora (2022).

Figura 85– Análise de desempenho acústico ao ruído de impacto do contrapiso com aditivo incorporador de ar (RCC4) contendo revestimentos superficiais de granito



Fonte: A autora (2022).

Todos os contrapisos especiais com areia de RCD e aditivo incorporador de ar (RCC 4) com revestimento apresentaram redução no nível de pressão sonora de impacto absoluto em relação ao contrapiso com a mesma composição, que era de 55 dB. Destaca-se aqui que o referido contrapiso com areia de RCD e acréscimo de aditivo incorporador de ar, foi a composição menos satisfatória para desempenho acústico em edificações. Ainda, ressalta-se que a maior redução observada foi para o revestimento de laminado de madeira e de revestimento de granito, com resultado de 52dB e 51dB respectivamente, valores menos significativos em relação às variações observadas para o contrapiso convencional e aquele contendo somente areia de RCD, raspas de borracha e argila expandida. Esse fato pode se justificar, principalmente pela pequena quantidade utilizada do aditivo para não prejudicar as propriedades mecânicas das placas, e no alto teor de absorção do RCD quando misturado com o aditivo incorporador de ar em sua composição.

Salienta-se que o resultado atingido coloca as composições na classificação de desempenho acústico mínimo segundo a NBR 15575 (2021), tendo ocorrido a melhora do desempenho acústica, mesmo que em menor grau, em todas as composições testadas do RCC4.

Além disso, enfatiza-se que novamente o revestimento de porcelanato foi o que apresentou o pior desempenho acústico ao comparar os diferentes revestimentos corroborando a informação já discutida previamente sobre a importância da espessura final do sistema de contrapiso (PEREYRON, 2008; SIMÕES, 2011, BERESFORD E CHEN, 2018; XAVIER, MELO, FERREIRA, 2020).

Com o intuito de realizar uma comparação final e definir as melhores configurações de contrapisos especiais, considerando as amostras ensaiadas, para redução do ruído de impacto, os valores absolutos de nível de pressão sonora ponderado de impacto normalizados ($L'_{n,w}$), bem como suas respectivas classificações conforme a NBR 15575 (2021) para áreas de uso coletivo em relação a unidades de habitações autônomas, foram reunidos e apresentados na Tabela 27.

Tabela 27– Valores absolutos de nível de pressão sonora de impacto ($L'_{n,w}$), em decibels (dB), obtidos na análise de desempenho acústico das argamassas de contrapiso contendo diferentes revestimentos superficiais e suas classificações considerando a NBR 15575 (2021).

REVESTIMENTOS	SISTEMAS DE PISOS				
	Convencional	RCC 1 (RCD)	RCC 2 (RCD + Borracha)	RCC 3 (RCD + Argila expandida)	RCC 4 (RCD + Incorporador de ar)
Contrapiso sem Revestimento	55	54	54	53	55
Desempenho acústico	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Piso de Cerâmica	53	52	50	52	53
Desempenho acústico	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Piso de Porcelanato	51	54	53	52	54
Desempenho acústico	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Piso de Laminado	47	45	50	44	52
Desempenho acústico	Intermediário	Superior	Intermediário	Superior	Mínimo
Piso de Vinílico	52	52	51	49	53
Desempenho acústico	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Intermediário	Mínimo
Piso de Granito	48	48	47	45	51
Desempenho acústico	Intermediário	Intermediário	Intermediário	Superior	Mínimo

Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 27 apresentada, destaca-se que todos os valores estão abaixo de 55 dB, definido pela NBR 15575 (2013) como valor mínimo para desempenho acústico ao ruído de impacto em uma edificação. Ainda, observa-se que a presença

dos revestimentos atenuou o nível de ruído de impacto, em qualquer um deles, onde os mais eficazes foram o laminado de madeira e o granito. É importante ressaltar que as placas que tiveram em sua composição juntamente com a areia de resíduo também a inclusão da argila expandida, obtiveram os melhores desempenhos acústicos, de acordo com o que preconiza a NBR 15575 (2021).

4.4 Cálculo da redução do nível sonoro normalizado de impacto

A seguir apresentam-se os resultados de caracterização do isolamento acústico proporcionado por cada sistema de contrapiso especial executado nessa pesquisa. Esses valores são estabelecidos pela redução do nível de ruído de impacto normalizado ($\Delta L'_n$), conforme a metodologia apresentada na Equação 5 desta tese, onde o mesmo se calcula pela diferença entre o nível de ruído de impacto normalizado de cada configuração de sistema de piso; e o nível de ruído de Impacto normalizado da laje zero, sem acabamento.

Ressalta-se que a medição do nível de pressão sonora de impacto com e sem contrapiso foi executada em uma laje maciça de referência da câmara acústica, de concreto armado com espessura de 200 mm; e, em 30 placas de 50 mm de contrapiso com composições especiais, conforme descrição e caracterização dos materiais desta tese.

Previamente a realização dos ensaios nas placas de contrapiso, foram feitas as medições na laje maciça da câmara acústica, sem acabamento, onde obteve-se como resultado o nível ponderado de pressão de impacto sonoro (L'_{nw}) de 76 dB, conforme demonstrado na Figura 52.

Os resultados da redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto, ΔL_w , em cada sistema de piso concebido e testado nesta pesquisa, estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28– Redução do nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos

REVESTIMENTOS	ΔL_w (dB) EM SISTEMAS DE PISOS				
	Convencional	RCC 1 (RCD)	RCC 2 (RCD + Borracha)	RCC 3 (RCD + Argila expandida)	RCC 4 (RCD + Incorporador de ar)
Contrapiso sem revestimento	21	22	22	23	21
Piso de Cerâmica	23	24	26	24	23
Piso de Porcelanato	25	22	23	24	22
Piso de Laminado de Madeira	29	31	26	32	24
Piso Vinílico	24	24	25	27	23
Piso de Granito	28	28	29	31	25

Fonte: A autora (2022).

Assim, analisando a Tabela 27 e 28, entre os sistemas de pisos criados e analisados nesta pesquisa, três deles ganham destaque, sendo eles o contrapiso especial RCC1, contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural, com assentamento de piso laminado com o resultado de 45 dB; o contrapiso especial RCC3 contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso laminado com o resultado de 44 dB atingido; e o contrapiso especial RCC3 contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso em granito com o resultado de 44 dB atingido; sendo os mesmos classificados com desempenho acústico superior (≤ 45 dB) segundo a NBR 15575 – 3 (2021), tendo uma redução do nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos (ΔL_w) de 31 dB, 32dB e 31dB, respectivamente, em relação a laje zero da câmara acústica como referência. Isto representa que, ao adicionar um contrapiso especial de 50 mm com o respectivo revestimento de piso das placas citadas, na laje estrutural de 200mm de espessura, o isolamento ao ruído de impacto aumentou em 31 dB, 32dB e 31dB.

5 CONCLUSÕES

Na presente tese foi realizado um estudo exploratório e experimental, onde foram analisados aspectos específicos de desempenho acústico ao ruído de impacto em sistemas de pisos, com o intuito de responder a seguinte questão de pesquisa que norteou o trabalho: *“A utilização de materiais alternativos em sistemas de contrapisos e pisos especiais, pode atender os critérios de desempenho acústico de acordo com o que preconizam as normas vigentes, em um sistema construtivo?”*

Assim, fez-se necessário detalhamento técnico minucioso na caracterização dos materiais selecionados para o desenvolvimento de novos sistemas de pisos com o aproveitamento de materiais reciclados. Para tanto, a investigação foi feita com base em uma busca sistemática de revisão bibliográfica sobre o tema no Brasil e em outros países, possibilitando assim a concepção de métodos e seleção de materiais e de equipamentos para a realização desta pesquisa.

Com relação ao controle tecnológico dos materiais desenvolvidos, destaca-se a grande complexidade para a definição dos traços de argamassas selecionadas, onde o desafio principal foi o de manter a consistência e a trabalhabilidade da argamassa convencional nas misturas criadas com materiais alternativos.

Com o objetivo de criar traços de argamassa utilizando-se de materiais alternativos com a mesma qualidade e segurança estipuladas por normativas brasileiras de execução quando utilizados insumos convencionais, não foi possível a substituição da areia de RCD em 100% da composição da argamassa, pois com essa mistura não se atingiu a resistência mínima necessária. Assim, após diversas misturas, obteve-se a composição de 70% de areia de RCD e 30% de areia média natural como adequada para a utilização, de acordo com o que preconiza a boa técnica de engenharia, com exceção da argamassa RCC3 com acréscimo de raspas de borracha, onde foi necessária a composição de 50% de RCD e 50% de areia média normal, que se justifica pela redução da rigidez e deformação da argamassa trazida pela presença da borracha.

Salienta-se o cuidado que se fez necessário com o estudo da dosagem de água, devido ao elevado índice de material pulverulento, ou seja, do elevado teor de finos que contêm na areia de RCD em comparação com a areia média natural. Destaca-se que na utilização de materiais alternativos nas composições das argamassas, se obteve resultados de absorção de água por capilaridade superiores

ao executado convencionalmente. A argamassa convencional teve o menor coeficiente de absorção de 14,30% aos 28 dias, sendo que com o traço de 70% de RCD, 30% de areia normal e acréscimo de argila expandida obteve o maior coeficiente de absorção, de 48,95% aos 28 dias. Também é importante destacar que esse sequestro de água pelo alto teor de finos do RCD aumenta o índice de vazios da argamassa e diminui a sua densidade, sendo este um dos fatores que diminui a sua resistência mecânica à compressão axial.

Os traços de argamassa apresentados nesta pesquisa resultou em uma mistura homogênea, com boa trabalhabilidade, consistência adequada, e no processo de cura mais eficaz possível, após os ajustes da relação água/cimento, sendo também importante destacar que a execução *in loco*, nas fases de lançamento e de adensamento das composições de argamassas com materiais alternativos ocorreram sem diferenças técnicas comparadas com a argamassa convencional com os traços demonstrados, sendo as argamassas criadas apropriadas para a execução em obras de edificações.

Assim, após a caracterização e seleção dos materiais para fabricação das peças de estudo, realizou-se o ensaio acústico nas diversas configurações de sistemas de pisos de acordo com o que preconizam as normas vigentes, no laboratório de acústica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Nas peças de contrapisos especiais fabricadas, foram ainda acrescentados diferentes revestimentos (cerâmica, porcelanato, laminado de madeira, piso vinílico e granito), com a finalidade de verificar também o desempenho acústico de materiais comerciais que são amplamente utilizados para assentamento de pisos.

Com relação às propriedades mecânicas de argamassas produzidas com areia de RCD, raspas de borracha de pneu, argila expandida e aditivo incorporador de ar, todos os traços apresentados nesta pesquisa são tecnicamente adequados para produção de argamassa para pavimentação, atendendo também os critérios de desempenho acústico de acordo com as normas vigentes, uma vez que todas as soluções atenderam pelo menos o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado mínimo (≤ 55 dB) estabelecido pela NBR 15575 (2021).

A partir dos resultados destes ensaios, foi possível a elaboração de quadros comparativos, identificando o desempenho acústico de isolamento ao ruído de impacto de cada sistema ensaiado, onde se destacaram as configurações com maior potencial de uso nas construções de edificações.

Quanto aos resultados dos traços estudados (Convencional, RCC1, RCC2, RCC3, RCC4) e seus cinco grupos de pisos (cerâmica, porcelanato, laminados de madeira, vinílico e granito), foi possível concluir que o conjunto de fatores que interferem para melhor atenuação sonora nas argamassas são: menor densidade; maior coeficiente de absorção; maior porosidade; e, o maior índice de vazios. Ressalta-se aqui também a importância do adensamento correto necessário durante a execução do contrapiso.

A presença dos revestimentos de piso atenuou o nível de ruído de impacto em todas as placas e, em geral, a inserção de argila expandida nas misturas apresentou desempenho acústico superior em relação às demais composições. Este resultado corrobora com a relação entre a densidade da argamassa e a melhoria do desempenho acústico, sendo que a argamassa contendo 70% de areia de RDC, 30% de areia média, e argila expandida teve a menor densidade em comparação aos demais sistemas de contrapiso, sendo o valor obtido de 1.337,58 kg/m³. Já a densidade aparente do contrapiso de RCD com raspas de borracha é de 1.433,12 kg/m³; com RCD e aditivo incorporador de ar é de 1.592,36 kg/m³; e, com areia de RCD é de 1.656,08 kg/m³, sendo todos os valores inferiores ao apresentado pelo argamassa para contrapiso convencional de 1974,52 kg/m³.

Entre os resultados obtidos, destacam-se as seguintes composições de contrapisos especiais: RCC1, contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural, com assentamento de piso laminado, com redução de nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos (ΔL_w) de 31 dB; RCC3, contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso laminado com redução de nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos (ΔL_w) de 32 dB; e, RCC3, contendo areia de RCD na proporção de 70% e 30% de areia natural e acréscimo de argila expandida, com assentamento de piso em granito e redução de nível sonoro ponderado de impacto nos sistemas de pisos (ΔL_w) de 31 dB.

Por fim, conclui-se, que a utilização de materiais alternativos reciclados em misturas de argamassas torna-se uma prática efetiva para sustentabilidade, e por conseguinte, contribui para reduzir a grande quantidade de resíduos da construção sem destinação e também na diminuição da utilização de recursos naturais. No tocante ao âmbito geral, os resultados obtidos atenderam com êxito o objetivo inicial proposto desta pesquisa que teve como diretriz a concepção de sistemas especiais

de contrapisos de edificações utilizando-se de materiais alternativos da construção civil que atendessem às normas técnicas quanto a segurança e qualidade, e também com relação ao desempenho acústico esperado em edificações.

A presente tese proporciona ainda uma metodologia de pesquisa e de experimentos, tornando-se uma base para a reciclagem de resíduos de construção e demolição com o propósito de ser utilizado na produção de argamassas, onde, utilizando-se da mesma metodologia se abre uma gama de possibilidades de utilização de outros materiais alternativos para testes.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Com o objetivo de contribuir na continuação desta pesquisa, e tendo observado a relevância e abrangência que o tema representa, quanto ao controle de ruído de impacto e reaproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD), ficam descritas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a inserção de outros materiais alternativos resilientes nas composições de argamassa criadas utilizando areia RCD, visando atingir níveis de desempenho acústico significativos;
- Investigar as características físicas de rigidez dinâmica dos sistemas de pisos. Destaca-se que a revisão da EN 12354-2 no ano de 2017 faz referência a uma nova fórmula para o cálculo da redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto, de acordo com as faixas de frequência, com peso maior no valor de rigidez dinâmica do que de massa por unidade de área da mesa do piso, o que significa que a rigidez dinâmica teria um reflexo maior no resultado final;
- Verificar a análise de custo de sistemas de contrapiso quando utilizados de materiais alternativos;
- Estudar demais características e propriedades dos contrapisos, de acordo com a NBR 15575 (2021).

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Blucher, 2011.

ALLEDI FILHO, C. *et al.* Melhoria Contínua baseada na capacidade de aprendizado da indústria de petróleo: guia visual para implementação do ambiente do conhecimento. **Revista Inteligência Empresarial**, COPPE/UFRJ, n. 13, 2003.

AMÂNCIO, F. A. *et al.* Análise do desempenho acústico em sistemas de vedação e piso em edificações multifamiliares. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 6, n. 2, 2019.

AMARILLA, R. S. D. *et al.* Acoustic barrier simulation of construction and demolition waste: A sustainable approach to the control of environmental noise. **Applied Acoustics**, v. 182, 2021.

AMARILLA, R. S. D. **Estudo de barreira acústica no controle de ruído em um câmpus universitário**. Tese (Doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de Resíduos de Construção e Demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição**. Câmara Ambiental da Construção, São Paulo, 2002.

ARAÚJO, M. A. **A moderna construção sustentável**. São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2016**. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2020**. São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos - Referências - Elaboração.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114: Resíduos sólidos na construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113: Resíduos sólidos na construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção da água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939: Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917: Agregado miúdo – Teores de sais cloretos e sulfatos.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos - Referências - Elaboração.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114: Resíduos sólidos na construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004.

BARBOSA, A. Q.; DOS SANTOS, C. D. B.; COSTA, D. M. Análise geral dos processos de fabricação de materiais cerâmicos para o setor da construção civil. **Interfaces Científicas-Exatas e Tecnológicas**, v. 2, n. 2, 2016.

BARBOSA, A. R. **Influência do Ruído Aeronáutico na População que reside nas imediações da Base Aérea de Santa Maria**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Editora LTC, 6 ed., v. 1, 2019.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Editora LTC, 6 ed., v. 2, 2019.

BERESFORD, T.; CHEN, J. Floor airborne and impact sound insulation performance of cross laminated timber vs. timber joist and concrete systems. **Hear to listen acoustics**, 2018.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. Oficina de Textos, v. 2, 2010.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. rev. São Paulo, SP: Blucher, 2011. 380 p.

BORGES, J. K. *et al.* An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. **Construction and Building Materials**, v. 161, 2018.

BORGES, J. G. K. **Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados**. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2015.

BRANCO, F. G.; GODINHO, L. On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. **Construction and Building Materials**, v. 45, 2013.

BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA - PROACÚSTICA. **Manual Pro Acústica de recomendações básicas para contrapisos flutuantes**. Material didático. São Paulo; 2015.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, 2015.

BRE - BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **BRE Environmental & Sustainability Standard**. 2008.

BRITO, J. A. **Cidade versus entulho**. Areia&Brita, 1998.

BURATTI, C.; BELLONI, E.; LASCARO, E.; LOPEZ, G.A.; RICCIARDI, P. **Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization**. Energy Procedia, 2016. Pag 972 - 979.

BUSTAMANTE, G.; BRESSIANI, J. C. **A indústria cerâmica brasileira**. Cerâmica industrial, 2000.

CABRAL, A. E. B. *et al.* Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, 2009.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**, v. 16, 2016.

CAIADO, A. R. **Contribuição ao Estudo da Rotulagem Ambiental dos Materiais de Construção Civil**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. LTC, 1 ed., 2000.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G. D. A. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Scientiarum Technology**, v. 29, n. 2, 2007.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, 2018.

CARELI, E. D. A. **Resolução CONAMA nº 307/2002 e as Novas Condições para Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição**. Dissertação (Mestrado) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. São Paulo, 2008.

CARVALHO, G. C. S.; MARQUES, C. S. A.; LANZINHA, J. C. G. Estudo da gestão de Resíduos de Construção e Demolição em município de pequeno porte no Brasil e em Portugal. In: **4º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. Gramado, 2021.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica**. Thesaurus, 2 ed., 2010.

CAVALCANTE, L. G. **Materiais construtivos, sustentabilidade e complexidade: a responsabilidade na especificação dos materiais**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CBCS - **CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/>. 2005.

CIB. **Agenda 21 para a construção sustentável**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR. Lei nº 8078 – Código de defesa do consumidor e normas correlatas. 1990.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307 - Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** 2002.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v.23, 2009.

CORRÊA, L. R. **Sustentabilidade na construção civil.** Monografia (Especialização), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

CORRÊA, M. M.; ASHLEY, P. A. Desenvolvimento Sustentável, Sustentabilidade, Educação Ambiental e Educação para o Desenvolvimento Sustentável: Reflexões para ensino de graduação. **REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 35, n. 1, 2018.

CSILLAG, D. **Análise das práticas de sustentabilidade em projetos de construção latino americanos.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

DELAZERI, J. C. **Desenvolvimento de contrapiso autonivelante para redução do ruído de impacto em edificações.** Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2021.

DI MAURO, F. J. P. **Madeira na construção civil: da ilegalidade à certificação.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.

DOLEZAL, F; GLASL; C.S. **Relevance of Acoustic Performance in Green Building Labels and Social Sustainability Ratings.** Energy Procedia, 2015. Pag1629 – 1634.

DONG, Y. H.; NG, S. T. **A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong.** Building and Environment 89 (2015), 183 - 191.

DUAN, H.; WANG, J.; HUANG, Q. Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: an integrative review and research agenda. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, 2015.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Managment of Construction and demolition wast.** 2000.

EUROPEAN NORM - **EN 16309:2014 - Sustainability of construction works - Assessment of social performance of buildings - Calculation methodology**, 2014.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 16, 2007.

EVEREST, F. A. **The Master Handbook of Acoustics**. McGraw-Hill, 4 ed., 2001.

FAHY, F. **Sound and Structural Vibration: radiation, transmission and response**. Academic Press, 1987.

FRAILE-GARCIA, E.; FERREIRO-CABELLO, J.; DEFEZ, B.; PERIS-FAJANES, GUILLERMO. Acoustic behavior of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste-tire rubber. **Materials**, v. 9, 2016.

FERRAZ, G. R. *et al.* Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo. In: **Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção civil**, São Paulo, 2001.

FERRAZ, R. **Atenuação de Ruído de Impacto em Pisos de Edificações de Pavimentos Múltiplos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

FERREIRA, D. G.; DE JESUS RIBAS, R. A.; DE PAULA, G. D. Desempenho acústico: parâmetros normativos x percepção da população. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, 2020.

FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. **Mercado de agregados no Brasil**. CETEM/MCTI, 2012.

FERREIRA, O. P. **Madeira: Uso sustentável na Construção Civil**. IPT/SVMA/SindusCon - SP, 2003.

FERREIRA NETO, M. F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais**. Campinas, SP, 2009. 257 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

FÜHR, G. *et al.* Impact sound attenuation of subfloor mortars made with exfoliated vermiculite and chrome sawdust. **Applied Acoustics**, v. 174, 2021.

FUHR, G. **Argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico: atenuação de ruídos de impacto em edificações**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

FURLANETTO NETO, A.; CASTRO, L. C. Análise acústica de contrapiso com adição de resíduos de pneu. **UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense**, 2012.

GALIVAN, R. M.; BERNOLD, L. E. Source evaluation of Solid Waste in Building Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, n. 120, 1994.

GERGES S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1992.

GONÇALVES, O. M. *et al.* Normas técnicas para avaliação de sistemas construtivos inovadores para habitações. **Normalização e Certificação na Construção Habitacional Coletânea HABITARE**, v. 3, 2003.

GOULART, S. V. G. **Levantamento da experiência internacional: experiência nos Estados Unidos**. Eletrobrás: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de Construção Básicos**. Ministério da Educação, 2011.

HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibrations: Theory and Practice**. World Scientific, 2009.

HELENE, P. R. L. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. Red Rehabilitar, 2003.

HOPKINS, C. **Sound Insulation**. Elsevier, 2 ed., 2012.

IBRAHIM, H. A. *et al.* Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and building materials**, v. 253, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10140-3: Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 3: Measurement of impact sound insulation**. Geneve, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-4: Acoustics Measurement of sound insulation in buildings and of building elements-Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms**. Geneve, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-5: Acoustics Measurement of sound insulation in buildings and of building elements-Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades**. Geneve, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-7: Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors**. Geneve, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-8: Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor**. Geneve, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717: Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements**. Geneve, 2020.

IPEA, INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos do Brasil -Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012.

ISLAM, R. *et al.* An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, 2019.

JACOBI, P. O. **Município no século XXI: cenários e perspectivas**. Meio ambiente e sustentabilidade, Cepam—Centro de Estudos e Pesquisas de Administração Municipal, 1999.

JOHN, V. M. **A construção e o meio ambiente**. Universidade de São Paulo, 1998.

KLEPA, R.B. *et al.* Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control. **Journal of Cleaner Production**, v.209, 2019.

KNABBEN, R. M. **Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

LA SERNA; H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2011.

LEAL FILHO, W.; MANOLAS, E.; PACE, P. The future we want: Key issues on sustainable development in higher education after Rio and the UN decade of education for sustainable development. **International Journal Of Sustainability In Higher Education**, v. 16, n. 1, 2015.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIMA, C. E. *et al.* Concreto asfáltico a quente dosado com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. **Holos**, v. 1, 2021.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. Elsevier Academic Press, 2006.

LOSSO, M.; VIVEIROS, E. Gesso acartonado e isolamento acústico: teoria versus prática no Brasil. In: **I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, São Paulo, 2004.

LU, W. *et al.* Computational Building information modelling for construction waste management: moving from rhetoric to reality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.68, 2017.

MALTA, J. O.; SILVA V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Gesta**, v. 1, 2013.

MAGALHÃES, M.C. **Fundamentos da acústica estrutural**. São Paulo, SP: All Print Editora, 2013. 270 p.

MAGALHÃES, R. F.; DANILEVICZ, A. M. F.; SAURIN, T. A. **Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects**. Waste Management (2017).

MAGALHÃES, P. H. S. **Análise do desempenho acústico de sistemas de fechamentos industrializados para edificações**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

MARQUES, H.F. *et al.* Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v.6, 2020.

MARTINS, D. S. *et al.* Análise de materiais para desempenho acústico em sistemas de pisos quanto ao isolamento de ruído de impacto. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, 2020.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics: principles and design**. Prentice Hall, 1999.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, 2018.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Economia e Desenvolvimento**, n. 16, 2004.

MINERVINO, A. M. S. **Avaliação do ruído de impacto em sistema de pisos de edificações com lajes pré-moldadas em João Pessoa-PB**. Monografia, Universidade Federal de Campina Grande. Sumé, 2018.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, 2009.

MITIDIARI, C. V. **Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações: proposições específicas à avaliação do desempenho estrutural**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

MOJOLLA, R. **Fonte geradora de impacto padrozinado**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

MOTTA, S. R. F. **Sustentabilidade na construção civil: crítica, síntese, modelo de política e gestão de empreendimentos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

MURGEL, E. **Fundamentos de Acústica Ambiental**. Senac, 1 ed., 2007.

NETO, M.F.F; BERTOLI, E.R. Conforto Acústico entre unidades habitacionais em edifícios residenciais de São Paulo, Brasil. In: **ACÚSTICA 2008**. Coimbra, 2008.

NETO, J. B. Critérios de projeto para seleção de materiais. In ISAIA G., **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ibracon, 2007.

NETO, M. F. F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.

NUNES, M. F. O.; ZINI, A.; PAGNUSSAT, D. T. Desempenho acústico de sistemas de piso: Estudos de caso para isolamento ao ruído aéreo e de impacto. **Acústica e vibrações**, v. 14, n. 46, 2014.

OLIVEIRA, C. N. **O paradigma da sustentabilidade na seleção de materiais e componentes para edificações**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

OLIVEIRA. H.M. Aglomerantes. In: BAUER, L.F.A. **Materiais de Construção I**. LTC, 5 ed., 2008.

OLIVEIRA, L. R. *et al.* Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. **Production**, v. 22, 2012.

OLIVEIRA, M. F. *et al.* Desempenho acústico de laje com vigota e lajota: isolamento ao som aéreo e de impacto. **Ambiente Construído**, v. 21, 2021.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. TecMinho, 2 ed., 2010.

PARK, S. H.; LEE, P. J.; JEONG, J. H. Effects of noise sensitivity on psychophysiological responses to building noise. **Building and Environment**, v. 136, 2018.

PATRÍCIO, J. V. **Acústica nos edifícios**. Verlag Dashöfer, 7 ed., 2018.

PAVANELLO, L. R. **Investigação do ruído gerado por instalações hidrossanitárias em uma edificação multifamiliar**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

PEREIRA, A.; GODINHO, L.; MATEUS, D.; RAMIS, J.; BRANCO, F.G. **Assessment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings**. *Applied Acoustics* 79 (2014) 92–103.

PEREYRON, D. **Estudo de tipologias de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Globo, 1975.

PIERRARD, J. F.; AKKERMAN, D. **Manual ProAcústica sobre a Norma de Desempenho: Guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da Norma ABNT NBR 15575:2013 Edificações habitacionais - Desempenho**. São Paulo, 2013.

PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de construção**. Erica, 2 ed., 2016.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Lei nº 12305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos – Disposições Gerais**, 2010.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, 2004.

RASMUSSEN, B. Sound Insulation between dwellings – Classification schemes and building regulations in Europe. In: **The International Congress and Exposition on noise control Engineering**, 33. Praga, 2004.

RESENDE, N. **Curitiba gera quase 2 milhões de toneladas de resíduos da construção civil por ano. Bem Paraná**. Publicado em: 03 de setembro de 2019. Disponível em: <https://www.bemparana.com.br/noticia/curitiba-gera-quase-2-milhoes-de-toneladas-de-residuos-da-construcao-civil-por-ano#.YQgCF45KjlU>. Acesso em: 02 de agosto de 2021.

REZENDE J. B.; RODRIGUES, F. C.; VECCHI, M. A. M. Uma análise de critérios de desempenho acústico para sistemas de piso em edificações. In: **XI Simpósio de Mecânica Computacional; II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional**. Juiz de Fora, 2014.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. Editora UFMG, 2 ed., 2006.

RINDEL, J.H. Sound insulation of buildings. In: **The International Congress and Exposition on noise control engineering**, 36. Istanbul, 2007.

ROBALO, K. *et al.* Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 273, 2021.

RODRÍGUEZ, C. *et al.* Use of Recycled Aggregates from Demolition Wastes in Concrete: Acoustic Properties. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 124, 2019.

ROSSI, C. T. **Desempenho ao ruído de impacto de laje pré-fabricada nervurada de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas com revestimento de pisos vinílicos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2020.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. Nobel, 1993.

SÁEZ, P.V.; OSMANI, M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. **Journal of Cleaner Production**, v.241, 2019.

SALES, U. C. **Mapeamento dos problemas gerados na associação entre sistemas de vedação e estrutura metálica e caracterização acústica e vibratória de painéis de vedação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2001.

SANTOS, W. S. *et al.* Estudo do uso de tecnologias alternativas para controle de ruído de impacto em edificações. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 4, 2020.

SCHULTMANN, F.; RENTZ, O. The state of deconstruction in Germany. In: KIBERT, C. J.; CHINI, A. R. **Deconstruction and material reuse: technology, economy and policy**. CIB, 2000.

SENA, J. S.; MORCELLI, C. P. R. Avaliação da incorporação de resíduos de construção civil na produção de argamassas. **Revista Científica UMC**, v. 3, n. 3, 2018.

SENA, P. G.; AMORIM, E. F.; INGUNZA, M. P. D. Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) utilizando Resíduos da Construção e Demolição de obras (RCD). **Matéria**, v. 24, 2019.

SILVA, G. T. M. *et al.* Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, 2020.

SILVA, M. R. **Materiais de Construção**. PINI, 1985.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R.K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: a review. **Journal of Cleaner Production**, v.143, 2017.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SIMÕES, F. M. **Acústica Arquitetônica**. Procel Edifica – Eficiência energética em edificações, Rio de Janeiro, 2011.

SOLIFORTE LTDA. **Soliforte Reciclagem**. Disponível em: <http://www.soliforte.com.br/> Acesso em: novembro de 2020.

SUPREMO SECIL CIMENTOS. **Laudo técnico Cimento Portland CPV**. Disponível em: <https://www.supremocimento.com.br/> Acesso em: novembro de 2021.

TAKAHASHI, V. F. M. **Desempenho acústico de edificações: ferramenta computacional para avaliação**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

TRENTIN, P. O.; PERARDT, M.; BALDIN, C. R. B.; STEDILE, K.; HOMRICH, J. T. O. Avaliação da influência da utilização de diferentes teores de cal e aditivo incorporador de ar em argamassas produzidas com 70% de areia de britagem. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, 2020.

TUDE SÁ, A. Uma abordagem matemática da informação: a teoria de Shannon e Weaver. *Filosofia da informação*, Rio de Janeiro, v. 5 n. 1, p. 48-70, set.2018/fev. 2019

TUTIKIAN, B. F. *et al.* Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 17, 2017.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). Disponível em: <http://www.usgbc.org>. 2010.

WANG, J. *et al.* Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, 2019.

WANG, L. *et al.* Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building materials**, v. 125, 2016.

WILSON, J. Recycling Construction and Demolition Waste: the dutch experience. **Quarry Managment**, v. 23, n. 12, 1996.

WOLF, M. **Teorie delle Comunicazioni di Massa**. 5.ª edição, Editorial presença. Lisboa, Setembro, 1999.

WON, J; CHENG, C.P. **Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization**. *Automation in Construction* 79 (2017) 3-18.

XAVIER, L. A. A.; MELO, A. B.; FERREIRA, E. T. Isolamento do ruído de impacto no sistema de piso com aplicação de revestimento sobre o piso original. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, 2020.

XIAO, J. *et al.* Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, 2018.

YANG, D.; LIU, M.; MA, Z. Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 2020.

YUSOF, A.N; AWANG, H.; IRANMANESH, M. **Determinants and outcomes of environmental practices in Malaysian construction projects**. Journal of Cleaner Production (2017), 345 e 354.

ZENID, G. J. **Madeira na construção civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2011.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Campinas. Campinas, 1997.

ZUCHETTI, P. A. B. **Patologias da construção civil: investigação patológica em edifício corporativo de administração pública no Vale do Taquari/RS**. Monografia, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2016.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; TUTIKIAN, B. F. Dynamic stiffness evaluation of floor covering system made of recycled EVA – Ethylene Vinyl Acetate. **Inter-noise and noise-com Congress and Conference Proceedings**, v. 250, n. 6, 2015.