

**AVALIAÇÃO ACÚSTICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM PÓ DE BORRACHA
PROVENIENTE DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA USO EM CONTRAPISO**

LARISSA CAMPOS GRANATO BOTELHO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL/2020

**AVALIAÇÃO ACÚSTICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM PÓ DE BORRACHA
PROVENIENTE DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA USO EM CONTRAPISO**

LARISSA CAMPOS GRANATO BOTELHO

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

ORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR JONAS ALEXANDRE

COORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR JOSÉ AUGUSTO PEDRO LIMA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL/2020

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

B748 Botelho, Larissa Campos Granato.

Avaliação acústica e mecânica de argamassas com pó de borracha proveniente de pneus inservíveis para uso em contrapiso / Larissa Campos Granato Botelho. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

143 f. : il.

Bibliografia: 115 - 120.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2020.

Orientador: Jonas Alexandre.

Coorientador: Jose Augusto Pedro Lima.

1. Argamassa. 2. Contrapiso. 3. Pó de borracha. 4. Isolamento acústico. 5. Pneus inservíveis. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

**AVALIAÇÃO ACÚSTICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM PÓ DE BORRACHA
PROVENIENTE DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA USO EM CONTRAPISO**

LARISSA CAMPOS GRANATO BOTELHO

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil".

Comissão Examinadora:

Prof. Dylmar Penteado Dias, D.Sc., UENF

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr., D.Sc., UENF

Prof. José Maria Franco de Carvalho, D.Sc., UFV

Prof. José Augusto Pedro Lima, D.Sc., UENF (Coorientador)

Prof. Jonas Alexandre, D.Sc., UENF (Orientador)

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivo geral	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
1.3 Justificativa	3
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Argamassa	5
2.1.1 Resistência mecânica	5
2.1.2 Trabalhabilidade	5
2.1.3 Retração	7
2.1.4 Aderência	7
2.2 Sistemas de piso	7
2.2.1 Contrapiso	9
2.2.2 Parâmetros para argamassa de contrapiso	13
2.3 Pneus	14
2.3.1 Pneus inservíveis	16
2.3.2 Histórico de estudos da borracha aplicada em argamassas e concretos	22
2.4 Ondas sonoras	26
2.4.1 Isolamento acústico	32
2.4.2 Equipamentos	37
2.4.3 A borracha aplicada na melhora do desempenho acústico	38
CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
3.1 Materiais	42
3.2 Escolha da dosagem	43
3.3 Denominação das argamassas	44
3.4 Caracterização da areia	44
3.5 Caracterização do pó de borracha	45
3.6 Granulometria	45
3.7 Massa unitária	47
3.8 Ensaios das argamassas no estado fresco	48
3.8.1 Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado	49
3.8.2 Retenção de água	50
3.8.3 <i>Squeeze flow</i>	51

3.9	Ensaio das argamassas no estado endurecido	54
3.9.1	Resistência à tração na flexão	54
3.9.2	Resistência à compressão axial	55
3.9.3	Resistência de aderência à tração	56
3.9.4	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	58
3.9.5	Densidade de massa aparente no estado endurecido	60
3.9.6	Absorção de água por capilaridade	61
3.9.7	Microscopia eletrônica de varredura	62
3.9.8	Difração de raios X	63
3.10	Execução das lajes	64
3.11	Execução dos contrapisos	65
3.12	Desenvolvimento da câmara acústica	67
3.13	Ensaio acústico	72
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES		77
4.1	Caracterização da areia	77
4.2	Caracterização do pó de borracha	78
4.3	Granulometria dos agregados	80
4.4	Massa unitária dos agregados	81
4.5	Ensaio nas argamassas	81
4.5.1	Densidade de massa no estado fresco	82
4.5.2	Teor de ar incorporado	82
4.5.3	Retenção de água	83
4.5.4	<i>Squeeze-flow</i>	84
4.5.5	Resistência à compressão	85
4.5.6	Resistência à tração na flexão	86
4.5.7	Resistência de aderência à tração	87
4.5.8	Absorção de água por imersão e índice de vazios	88
4.5.9	Massa específica	89
4.5.10	Densidade de massa aparente no estado endurecido	90
4.5.11	Absorção de água por capilaridade	92
4.5.12	Difração de raios X	93
4.5.13	Microscopia eletrônica de varredura	94
4.6	Ensaio acústico	96
4.6.1	Câmara acústica vazia	96
4.6.2	Ruído aéreo	97
4.6.3	Ruído de impacto	103
4.6.3.1	Medição realizada pelo microfone	103
4.6.3.2	Medição realizada pelo piezelétrico	107
4.6.4	Medição pelo decibelímetro	111
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		112
REFERÊNCIAS		115

ANEXO I – ANÁLISE ESTATÍSTICA _____	121
ANEXO II – TABELAS PARA ANÁLISES ESTATÍSTICAS _____	129

RESUMO

Durante muitos anos o conforto acústico foi negligenciado pela construção civil e pelas normas técnicas brasileiras, evidenciando a necessidade da elaboração de operações e técnicas construtivas que atenuem a passagem de ruídos em edificações. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo estudar os desempenhos acústico e mecânico em argamassas para uso em contrapisos. Para tanto, foi escolhido o pó de borracha de pneus provenientes do setor de recauchutagem, após serem moídos por processo mecânico, com tamanho de suas partículas inferior a 0,85 mm; tendo em vista que esses resíduos sólidos, se dispostos inadequadamente, podem resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. Foram desenvolvidas argamassas na dosagem em massa de 1:3 (cimento:areia) com proporções de 100% de areia (referência) e com 10%, 20% e 30% de substituições de areia pelo resíduo. Com essas argamassas foram confeccionados contrapisos com 4 cm de altura lançados em lajes maciças de concreto armado de 50 x 50 x 8 cm, onde foram realizados os ensaios acústicos para medição dos ruídos de impacto e aéreo na Câmara Acústica Arenato, elaborada nessa dissertação. Ainda foram realizados os ensaios de caracterização dos agregados e os ensaios nas argamassas, sendo eles squeeze flow, densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado, retenção de água, densidade de massa no estado endurecido, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios e de resistência à aderência à tração. Os resultados foram tratados estatisticamente através de ANOVA e Teste de Tukey. Em relação às propriedades mecânicas, observou-se que os teores de substituição elevaram o índice de vazios e reduziram a densidade de massa das argamassas, implicando na redução das resistências à compressão e à tração, principalmente para teores com 20% ou mais de resíduo. Por outro lado, as propriedades de absorção de água por capilaridade e retenção de água melhoraram para amostras com maiores teores de substituição. Do ponto de vista acústico, as argamassas com maior potencial de isolamento sonoro foram as argamassas com 20 e 30% de borracha, sendo que o contrapiso A30 atenuou 4 dB a mais do que o contrapiso confeccionado com argamassa convencional. Já por parte da viabilidade técnica, a compatibilidade entre as propriedades físicas, mecânicas e acústicas não foi alcançada em nenhuma argamassa com adição, sugerindo que novos estudos devem ser feitos em dosagens com menores teores de substituição ou em soluções que melhorem a aderência entre a pasta cimentícia e a superfície da borracha.

Palavras-chave: Argamassa, Contrapiso, Pó de Borracha, Isolamento Acústico, Pneus inservíveis, Ruído de Impacto, Ruído Aéreo

ABSTRACT

For many years, acoustic comfort has been ignored by civil construction and by Brazilian technical standards, highlighting the need in development of operations and construction techniques that attenuate the passage of noise in buildings. In this context, the objective of this study is to analyze the acoustic and mechanical performance in mortar for use in screeds. For this purpose, mechanically ground rubber powder from waste tires with particle sizes of less than 0.85mm coming from the retreading sector was chosen; these solid residues, if improperly disposed of, can result in a serious risk to the environmental and public health. Mortars were developed in a 1:3 mass ratio (cement:sand) with proportions of 100% sand incorporation (reference) and with 10%, 20% and 30% sand substitution by the rubber residue. With these mortars, 4cm screeds were made on 50x50x8cm concrete slabs, where acoustic tests were performed to measure impact and aerial noise. Aggregate characterization tests and mortar tests were also performed. The results were processed statistically using ANOVA and Tukey Test. Regarding the mechanical properties, it was observed that the replacement contents increased the void index and reduced the mortar mass density, implying reduction of compressive and bond strength, mainly for contents with 20% or more of residue. On the other hand, the properties of water absorption by capillarity and water retention improved for samples with higher substitution levels. From an acoustic point of view, the mortars with greater sound insulation potential were the mortars with 20 and 30% of rubber, and the screed A30 attenuated 4dB more than the screed made with conventional mortar. As far as technical feasibility is concerned, compatibility between physical, mechanical and acoustic properties was not achieved in any mortar with added rubber residue, suggesting that new studies should be made of ratios with lower replacement values or in solutions that improve adhesion between the cement paste and rubber surface.

Keywords: Mortar, Screed, Rubber Powder, Soundproofing, Waste Tires, Impact Noise, Aerial Noise

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte do sistema de pisos _____	8
Figura 2 - Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos _____	8
Figura 3 - Contrapiso flutuante sobre laje _____	10
Figura 4 - Execução de um contrapiso _____	12
Figura 5 - Composição de pneus _____	15
Figura 6 - Pneus inservíveis _____	16
Figura 7 - Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados por estado (2017) _____	19
Figura 8 - MEV das misturas contendo 30% de borracha: esquerda: partículas menores; direita: partículas maiores _____	25
Figura 9 - MEV das argamassas com pó de borracha natural (esquerda) e com pó de borracha tratada com NaOH (direita) _____	26
Figura 10 – Ondas sonoras _____	26
Figura 11 - Sons graves e agudos no domínio do tempo _____	29
Figura 12 - Contornos padrão de audibilidade para tons puros _____	30
Figura 13 - Subdivisão das faixas de frequência graves, médios e agudos. _____	30
Figura 14 - Comprimento de onda (λ) _____	31
Figura 15 - Ruído branco no domínio do tempo _____	32
Figura 16 – Ilustração de ruído propagado no ar e na estrutura _____	32
Figura 17 – Tipos de ondas nos sólidos _____	33
Figura 18 - Fenômenos que podem ocorrer quando uma onda encontra um obstáculo _____	33
Figura 19 - Variação do coeficiente de absorção sonora em função da frequência para um material hipotético _____	36
Figura 20 – Relação entre NRC e densidade _____	39
Figura 21 - Ilustração do ar preso no concreto com borracha _____	40
Figura 22 - Pó de borracha _____	43
Figura 23 - Peneiras para ensaio de granulometria _____	46
Figura 24 - Recipiente cilíndrico utilizado nos ensaios cujo volume é conhecido (400 cm ³) _____	47
Figura 25 - Ensaio de massa unitária _____	48
Figura 26 - Aparelho utilizado no ensaio de retenção de água _____	50
Figura 27 - Ensaio <i>squeeze flow</i> _____	52
Figura 28 - Molde cilíndrico para ensaio <i>squeeze flow</i> _____	52
Figura 29 - Perfil típico de carga x deslocamento em um ensaio <i>squeeze flow</i> para argamassas _____	53
Figura 30 - Soquete metálico _____	54
Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão _____	55
Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão _____	56
Figura 33 - Corpos de prova para ensaio de resistência de aderência à tração _____	57
Figura 34 - Cortes nas argamassas sendo realizados com serra copo _____	57
Figura 35 - Dinamômetro utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração _____	57

Figura 36 - Ensaio de resistência de aderência à tração sendo executado _____	57
Figura 37 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração _____	58
Figura 38 - Ensaio de absorção de água. A) Corpos de prova em ebulição. B) Registro da massa imersa _____	59
Figura 39 - Medição dos corpos de prova _____	60
Figura 40 - Ensaio de absorção de água por capilaridade _____	61
Figura 41 - Amostras para microscopia eletrônica de varredura _____	63
Figura 42 - Equipamento utilizado para recobrimento por deposição metálica sobre as amostras _____	63
Figura 43 - Amostras das argamassas para ensaio de DRX _____	64
Figura 44 - Detalhamento da armadura positiva das lajes _____	64
Figura 45 - Passo-a-passo da confecção das lajes: A) Execução das formas; B) Aplicação de desmoldante; C) Armação montada e posicionada; D) Lajes concretadas _____	65
Figura 46 - Vista frontal das lajes e contrapisos _____	66
Figura 47 - Passo-a-passo da execução do contrapiso: A) Polvilho de cimento; B) Compactação do contrapiso com soquete de madeira; C) Sarrafeamento; D) Contrapiso pronto _____	66
Figura 48 - Amostras de contrapisos concluídas _____	67
Figura 49 - Câmara acústica Arenato. A) Projeto; B) Execução _____	67
Figura 50 – Vista interna das partes superior e inferior da câmara acústica (projeto) _____	68
Figura 51 – Vista interna das partes superior e inferior da câmara acústica (execução) _____	68
Figura 52 - Vista superior da câmara acústica e seus materiais constituintes _____	69
Figura 53 - Cabos de aço suspendendo a parte superior da câmara acústica _____	70
Figura 54 - Vistas internas da câmara acústica _____	70
Figura 55 - Corta AA da câmara acústica _____	71
Figura 56 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados no ensaio de desempenho acústico _____	73
Figura 57 - Leitura no decibelímetro _____	74
Figura 58 - Equipamentos para ensaio acústico (a) computador a esquerda e amplificador de potência a direita, (b) decibelímetro, (c) sensor de vibração, (d) mesa misturadora de áudio, (e) microfones, (f) alto falante, (g) dispositivo gerador de ruído de impacto _____	74
Figura 59 - <i>Software Realtime Analysing System</i> _____	75
Figura 60 – Posicionamento da laje + contrapiso na câmara feito através de ponte rolante _____	76
Figura 61 - Difratoograma de raios X da areia _____	78
Figura 62 - Difratoograma de raios X do pó de borracha _____	79
Figura 63 - Micrografias obtidas por MEV do pó de borracha _____	79
Figura 64 - Granulometria dos agregados _____	80
Figura 65 - Teor de ar incorporado _____	83
Figura 66 - Retenção de água das argamassas _____	83
Figura 67 - Curvas <i>squeeze-flow</i> rápido _____	85
Figura 68 - Curvas <i>squeeze-flow</i> lento _____	85
Figura 69 - Resistência à compressão nas argamassas _____	86
Figura 70 - Resistência à tração nas argamassas _____	87
Figura 71 - Resistência de aderência à tração _____	87

Figura 72 - Rupturas nos corpos de prova. A) Ruptura na argamassa, B) Ruptura na interface substrato/argamassa _____	88
Figura 73 - Absorção de água por imersão _____	89
Figura 74 - Índice de vazios _____	89
Figura 75 - Massa específica da amostra seca _____	90
Figura 76 - Massa específica da amostra saturada _____	90
Figura 77 - Massa específica real _____	90
Figura 78 - Densidade de massa aparente no estado endurecido _____	91
Figura 79 - Corpos de prova no ensaio de capilaridade _____	92
Figura 80 - Absorção de água por capilaridade _____	93
Figura 81 - Digratogramas de raios X das argamassas; Q = quartzo, C = calcita, P = portlandita ____	94
Figura 82 - Ampliação de 100x das argamassas: A) A0; B) A10 _____	95
Figura 83 - Ampliação de 40x das argamassas: A) A0; B) A10; C) A20; D) A30 _____	95
Figura 84 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído de fundo _____	97
Figura 85 – Medição através de microfones do nível de pressão sonora na câmara acústica vazia com ruído branco sendo emitido _____	97
Figura 86 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído branco (normalizados) _____	97
Figura 87 - Curvas normalizadas de pressão sonora medidas no ensaio de ruído aéreo _____	99
Figura 88 - Ensaio de ruído aéreo _____	100
Figura 89 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído aéreo _____	101
Figura 90 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído aéreo nos contrapisos estudados _____	102
Figura 91 – Ensaio de ruído de impacto medidos pelos microfones _____	104
Figura 92 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído de impacto _____	105
Figura 93 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído de impacto nos contrapisos estudados captados pelos microfones _____	106
Figura 94 - Ensaio de ruído de impacto medidos pelos piezelétricos _____	108
Figura 95 - Análise dos sensores piezelétricos superior e inferior no ruído de impacto _____	109
Figura 96 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído de impacto nos contrapisos estudados medidos pelos sensores piezelétricos _____	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição das propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas	6
Tabela 2 - Propriedades de algumas marcas de argamassas industrializadas	13
Tabela 3 - Propriedades de argamassas de assentamento e revestimento	14
Tabela 4 - Composição química média de um pneu	15
Tabela 5 - Total de pneus produzidos, importados e exportados (2017)	18
Tabela 6 - Capacidade de coleta de pneus inservíveis nos municípios do Rio de Janeiro	20
Tabela 7 - Tecnologias de destinação final de pneus inservíveis	21
Tabela 8 - Quantidade de pneus inservíveis destinados adequadamente por região brasileira	21
Tabela 9 - Velocidade do som para diferentes meios de propagação	27
Tabela 10 - Alguns níveis sonoros	29
Tabela 11 - Coeficientes de absorção sonora para diversos tipos de materiais	35
Tabela 12 - Nível de desempenho acústico mínimo em relação ao ruído de impacto	36
Tabela 13 - Critério de diferença padronizada de nível ponderada em relação ao ruído aéreo	36
Tabela 14 - Valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava	37
Tabela 15 - Dados do cimento	42
Tabela 16 - Estudo de dosagens	43
Tabela 17 - Denominação das argamassas pesquisadas	44
Tabela 18 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica	46
Tabela 19 - Materiais escolhidos para a câmara acústica e suas especificações	69
Tabela 20 - Composição química da areia	77
Tabela 21 - Composição química do pó de borracha	78
Tabela 22 - Porcentagem das frações granulométricas	80
Tabela 23 - Módulo de finura e diâmetro máximo dos grãos	81
Tabela 24 - Massa unitária dos agregados	81
Tabela 25 - Densidade de massa no estado fresco	82
Tabela 26 - Massas e volumes dos corpos de prova de diferentes proporções	91
Tabela 27 - Coeficiente de capilaridade	93
Tabela 28 - Medições nos ensaios de ruído aéreo e ruído de impacto feitas no decibelímetro na parte inferior da câmara acústica	111
Tabela 29 - Tabela ANOVA para DIC	121
Tabela 30 - ANOVA para DIC da retenção de água ($p \leq 0,05$)	122
Tabela 31 - Teste de Tukey para contraste de médias da retenção de água ($p \leq 0,05$)	123
Tabela 32 - ANOVA para DIC da resistência à compressão ($p \leq 0,05$)	123
Tabela 33 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão ($p \leq 0,05$)	123
Tabela 34 - ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$)	124
Tabela 35 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$)	124
Tabela 36 - ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$)	124
Tabela 37 - Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$)	125

Tabela 38 - ANOVA para DIC do índice de vazios ($p \leq 0,05$) _____	125
Tabela 39 - Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ($p \leq 0,05$) _____	125
Tabela 40 - ANOVA para DIC da massa específica real ($p \leq 0,05$) _____	126
Tabela 41 - Teste de Tukey para contraste de médias da massa específica real ($p \leq 0,05$) _____	126
Tabela 42 - ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$) _____	126
Tabela 43 - Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$) _____	127
Tabela 44 - ANOVA para DIC da capilaridade aos 10 minutos ($p \leq 0,05$) _____	127
Tabela 45 - Teste de Tukey para contraste de médias da capilaridade aos 10 minutos ($p \leq 0,05$) _	127
Tabela 46 - ANOVA para DIC da capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$) _____	128
Tabela 47 - Teste de Tukey para contraste de médias da capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$) _	128
Tabela 48 - Limites unilaterais de F ao nível de 95% de confiança _____	129
Tabela 49 - Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança. _____	130

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O conforto acústico nas edificações, antes considerado algo subjetivo, com o passar dos anos tornou-se mensurável e obrigatório. As medições e avaliações de desempenho acabaram por refletir na qualidade final de um projeto arquitetônico, exigindo soluções e controle dos efeitos nocivos causados pela propagação de ruídos sobre a qualidade de vida dos habitantes da edificação.

Em meio aos elevados índices de reclamações a respeito da geração de ruídos por parte de usuários das edificações, geralmente em habitações de múltiplos pavimentos, entrou em vigor em 19 de julho de 2013, a NBR 15575 (ABNT, 2013), norma que visa garantir o desempenho acústico e atender às exigências dos usuários de uma edificação definindo os níveis de transmissão de ruídos aceitáveis.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) define que os sistemas de pisos que separam unidades habitacionais autônomas em diferentes andares devem garantir um desempenho adequado de isolamento acústico aéreo (conversações, TV, música etc.) e de isolamento acústico ao ruído de impacto (passos, queda de objetos, arrastar de móveis etc.). Os sistemas de pisos estão compostos pelos elementos de camada estrutural (laje), contrapiso e acabamento.

Visto a recente exigibilidade da NBR 15575/2013, a adequação aos requisitos de desempenho ainda é um processo lento e gradativo, gerando a busca de soluções mais adequadas para satisfazer as exigências desta norma. A evolução nos processos construtivos, aliado ao crescimento das tecnologias de materiais, interferem diretamente na qualidade acústica final das edificações.

No mercado atual brasileiro, as soluções acústicas comumente empregadas para o isolamento de ruídos de impacto se restringem a utilização de mantas acústicas sob uma camada de contrapiso. Estas soluções, além da exigirem mão de obra especializada para execução, ainda carecem de pesquisas quanto à avaliação do verdadeiro desempenho acústico.

A fim de contribuir com os esforços de atenuação de ruídos em edificações de múltiplos pavimentos, este trabalho estuda a incorporação de um resíduo sólido na argamassa aplicada em contrapiso, já que com o crescente desenvolvimento urbano, o acúmulo de resíduos sólidos também tem sido objeto de pesquisas para o aproveitamento em materiais alternativos.

A busca pela sustentabilidade além de ser uma preocupação ambiental é também uma preocupação econômica, que proporciona o desenvolvimento de novas tecnologias e economia financeira. Neste aspecto, a construção civil é um dos setores que tem absorvido grandes quantidades de resíduos sólidos reciclados em componentes de edificações.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define os resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição e lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, sendo estes gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Esses resíduos, levando-se em consideração o potencial de crescimento e o poder de degradação, podem causar impacto tanto ambiental quanto à saúde da população se descartado de forma inadequada.

Um exemplo de resíduo que se encontra com facilidade e em abundância no Brasil, e que, principalmente, não pode ser descartado de forma inadequada, é o pneu inservível, que é um pneu que atingiu o limite de sua vida útil e apresenta danos irreparáveis em sua estrutura. Segundo o relatório de pneumáticos do IBAMA de 2018, foram fabricados 1.076.801,84 pneus novos e foram geradas 585.252,32 toneladas de pneus inservíveis no Brasil no ano de 2017. Além disso, a NBR 10004 (ABNT, 2004) considera a borracha de pneu como resíduo Classe II, não perigoso, ou seja, que não causa riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos nos desempenhos acústico e mecânico de argamassas com incorporação do resíduo de pó de borracha proveniente de pneus inservíveis em substituição ao agregado miúdo para uso em contrapisos de edificações.

1.2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Caracterização química, física e mineralógica do resíduo de borracha estudado, a fim de comparar com os parâmetros do material a ser substituído, isto é, a areia;
- Analisar os parâmetros no estado fresco (squeeze flow, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e retenção de água) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição da areia por pó de borracha;
- Analisar os parâmetros no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração, densidade de massa no estado

endurecido, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição da areia por pó de borracha;

- Elaborar uma câmara acústica a fim de realizar os ensaios acústicos e comparar a eficiência dos contrapisos de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição da areia por pó de borracha;

- Obter o melhor teor de substituição de borracha pela areia sem prejuízos nas propriedades mecânicas da argamassa e com melhora no desempenho acústico.

1.3 Justificativa

Edifícios de múltiplos pavimentos são investimentos altamente lucrativos. Esse desenvolvimento da verticalização e de novas tecnologias construtivas fez com que novas normas fossem elaboradas, a fim de que fossem padronizados o desempenho técnico e a qualidade oferecida aos consumidores.

O conforto acústico é de fundamental importância para a saúde e bem-estar das pessoas. Por isso deve-se assegurar o nível de ruído adequado à função ou finalidade do ambiente e propiciar condições mínimas de desempenho acústico no interior de uma edificação, com relação a fontes de ruídos de impacto e aéreo (NBR 15575, ABNT 2013).

Outra questão é que, associado a um grande desenvolvimento tecnológico, existe um aumento na produção de ativos industrializados e na quantidade de recursos minerais explorados (SANTOS *et al.*, 2016), isso faz com que haja um grande aumento na quantidade de resíduos sólidos gerados todos os dias no mundo todo; em 2018, somente no Brasil, foram geradas cerca de 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbano (RSU) (ABRELPE, 2019). Entre esses resíduos, estão os pneus inservíveis, que devem ser preferencialmente reutilizados e reciclados, conforme consta na Resolução CONAMA nº 416 (2009).

Devido à gravidade desta questão, ações governamentais atribuíram novas responsabilidades aos representantes da indústria de pneus, fábricas e revendedores, que em conjunto com órgãos ambientais de fiscalização e controle, passaram a ter um papel decisivo no gerenciamento deste resíduo (CONAMA, 2009).

Considerando os problemas que a gestão inadequada e ineficiente de resíduos pode causar, muitos países em desenvolvimento identificaram a necessidade de esboçar planos de gerenciamento de resíduos. Entretanto, em muitas ocasiões isto não é factível principalmente por causa da falta de recursos (ABRELPE, 2020). Com a necessidade de reduzir o passivo

ambiental representado pelo estoque de pneus descartados que hoje existe, tornou-se inadiável a criação de soluções para minimizar ou reaproveitar esses materiais.

O reaproveitamento dos resíduos de pneus inservíveis apresenta grandes benefícios ambientais, contribuindo para a redução de grandes espaços ocupados em aterros, diminuindo a proliferação de insetos e roedores quando armazenados incorretamente, reduzindo possíveis alagamentos e enchentes quando jogados em rios e córregos, além de contribuir com a diminuição de gases poluentes emitidos na atmosfera provocada pela queima de pneus.

Considerando a grande quantidade de pneus descartados anualmente e a possibilidade de melhorias na qualidade do produto para a construção civil, presume-se que a incorporação de borracha de pneus pode contribuir significativamente no desempenho acústico e no comportamento mecânico das argamassas.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argamassa

A argamassa é um material de construção que pode ser definido como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento (ABNT NBR 13281, 2005).

Possui como principais aplicações o assentamento de alvenarias, as etapas de revestimento (chapisco, reboco e emboço), os contrapisos e ainda no assentamento de revestimento cerâmicos.

2.1.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica nas argamassas diz respeito à propriedade de possuírem um estado de consolidação interna, capaz de suportar ações mecânicas das mais diversas naturezas, e que se traduzem em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (SABBATINI, 1990).

A relação água/aglomerante das argamassas é fator determinante na resistência mecânica. Quanto maior a quantidade de água, menor será a resistência mecânica das argamassas. Outro fator que influencia na resistência das argamassas é a técnica de execução. Dependendo da forma de aplicação, pode-se levar a uma maior compactação, gerando uma estrutura mais densa e de maior dureza superficial, e uma conseqüente maior resistência às ações de desgaste por abrasão e de impactos (CARASEK, 2010).

2.1.2 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco, que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea. É uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial (CARASEK, 2010). Na Tabela 1 estão definidas essas propriedades.

Tabela 1 - Definição das propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedade	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação. Essa propriedade é influenciada pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e intensidade de mistura e pela presença de aditivos (principalmente do aditivo incorporador de ar).
Retenção de água	É a capacidade da argamassa fresca manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água de amassamento, seja por evaporação, seja pela absorção de água da base.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água da pasta da argamassa, de modo que a água suba e os agregados desçam pelo efeito da gravidade. Argamassas de tendência fluida apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de um material.
Adesão inicial	União inicial de argamassas no estado fresco ao substrato. Está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial.

Fonte: Adaptado de CARASEK, 2010

Em relação à consistência, as argamassas podem ser classificadas como seca, plástica e fluída. Na argamassa seca, a pasta aglomerante somente preenche os vazios entre os agregados, deixando os ainda em contato. Existe atrito entre as partículas que resulta em argamassa áspera. Na argamassa plástica, uma fina camada de pasta aglomerante entra em contato com a superfície dos agregados, proporcionando uma boa adesão entre eles. Na argamassa fluída, as partículas de agregado estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência a depositar-se por gravidade (ocorre segregação). Os grãos de areia não oferecem nenhuma resistência ao deslizamento, sendo a argamassa tão líqüida que se espalha sobre a base (CARASEK, 2010).

Dentre as propriedades citadas, a retenção de água torna-se extremamente importante quando a argamassa é aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou em condições climáticas desfavoráveis (alta temperatura, baixa umidade relativa e ventos fortes). Ela é alterada em função da composição da argamassa.

A densidade de massa varia com o teor de ar (principalmente quando incorporado por meio de aditivos) e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa

(principalmente do agregado). A medida em que se aumenta o teor de ar incorporado nas argamassas, diminui-se a densidade de massa.

2.1.3 Retração

Retração é a variação de volume da pasta aglomerante que ocorre principalmente, devido à secagem, porém parte dessa retração também ocorre devido às reações de hidratação dos aglomerantes. Ela está relacionada a outras propriedades da argamassa, principalmente a estanqueidade e a durabilidade (CARASEK, 2010). Se a secagem da argamassa é lenta, ela tem tempo suficiente para atingir uma resistência à tração necessária para suportar as tensões internas que surgirem. Porém quando o clima está quente, seco e com ventos fortes, ocorre uma aceleração na evaporação da água e uma consequente geração de fissuras de retração.

2.1.4 Aderência

A aderência da argamassa ao substrato é um fenômeno mecânico, devido, basicamente, à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação, provocando o fenômeno de ancoragem. A aderência possibilita a camada de revestimento resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com a base.

Os fatores que influenciam e são decisivos no desempenho dessa propriedade são os materiais constituintes das argamassas, tanto a natureza como as proporções, as características do substrato (porosidade, absorção de água e rugosidade) e o seu preparo (limpeza e tratamentos superficiais), as técnicas de execução e as condições climáticas, durante a aplicação (CARASEK, 2010).

2.2 Sistemas de piso

Muitos são os conceitos encontrados na literatura atual a respeito da execução do sistema de piso, conceitos esses que são diferentes pela falta de normas que regularizem e padronizem essas informações. Trata-se de uma atividade comumente não programada e não controlada no conjunto dos serviços, resultando em desperdícios das mais diversas naturezas.

Fiorito (2009) descreve que o piso é composto pelas seguintes camadas: laje ou lastro de concreto simples; 1,0 mm de pasta de cimento, cuja função é de garantir a aderência entre a argamassa e a superfície da laje (relação água cimento de 0,3); 2,5 cm de contrapiso

(dosagem 1:1/2:5 de cimento, cal e areia); camada de argamassa colante com espessura de 3,0 a 6,0 mm (dependendo das dimensões da superfície da peça cerâmica); e revestimento cerâmico (Figura 1).

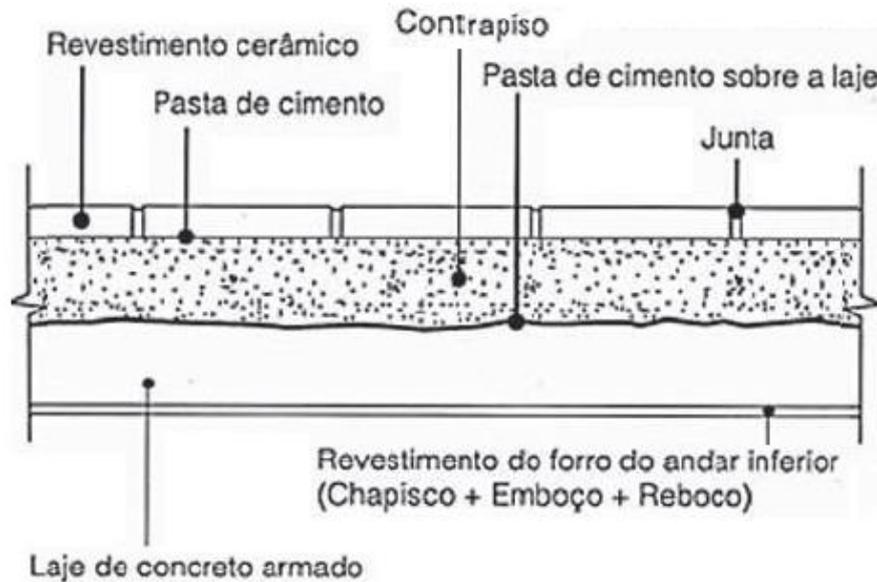


Figura 1 - Corte do sistema de pisos

Fonte: (adaptado de Fiorito, 2009)

A NBR 15575 (ABNT, 2013) descreve o sistema de piso como um sistema horizontal ou inclinado composto por um conjunto parcial ou total de camadas (por exemplo, camada estrutural, camada de contrapiso, camada de fixação, camada de acabamento) destinado a cumprir a função de estrutura, vedação e tráfego (Figura 2).



Figura 2 - Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos

Fonte: Autoria própria

2.2.1 Contrapiso

Contrapiso é um elemento do sistema de piso constituído por uma ou mais camadas de material, lançado sobre uma base (laje estrutural) ou sobre uma camada intermediária (de impermeabilização ou de isolamento termo acústico), devendo apresentar características como regularidade superficial, resistência mecânica, compactidade e durabilidade adequadas ao atendimento de suas funções (BARROS, 1991).

Suas funções são regularizar a base para colocação de revestimento, transmitir à laje as cargas de utilização, possibilitar desníveis entre ambientes, proporcionar declividades para escoamento de água, permitir eventual embutimento de instalações, ser barreira estanque ou impermeável e isolante térmico e acústico.

As propriedades que são mais requeridas no contrapiso, segundo Barros (1991), são:

- resistência mecânica: capacidade do contrapiso de manter sua integridade física quando solicitado pelas diversas ações. Refere-se principalmente as resistências ao desgaste superficial por abrasão, ao choque, à compressão, à tração e ao cisalhamento;
- aderência: é decorrente da existência de continuidade da pasta que penetra nos poros da base e da pasta que fica incorporada à argamassa de contrapiso, ocorrendo, portanto, uma ancoragem mecânica por meio da formação de pequenas cunhas internas aos poros. Como é comum a utilização de uma argamassa com baixo teor de água, a aderência é garantida com a aplicação de uma ponte de aderência sobre a base. Nesse caso, utiliza-se uma nata de cimento aplicada imediatamente antes do lançamento da argamassa de contrapiso;
- capacidade de absorver deformações: o contrapiso está sujeito a diversas solicitações que lhe provocarão o aparecimento de tensões de tração, compressão e cisalhamento, que deverão ser absorvidas ou dissipadas, sem desagregar-se, sem apresentar um estado de fissuração acentuado e sem perder a sua aderência com a base, ou seja, sem apresentar danos que possam comprometer o seu funcionamento;
- condições superficiais: reúnem-se nesta propriedade os aspectos relativos ao nivelamento, planeza, regularidade, textura, porosidade e limpeza da superfície do contrapiso;
- durabilidade: capacidade de manter o desempenho de suas funções ao longo do tempo. Difícil de ser avaliada, pois depende de todas as propriedades anteriores e das solicitações e a exposição a que o contrapiso ficará submetido durante sua vida útil.

O contrapiso pode ser classificado quanto à aderência levando-se em consideração a intensidade de ligação entre o contrapiso e a base. Barros (1991) considera a efetiva ligação quando o contrapiso estiver integrado à laje, de modo que os esforços atuantes e as

deformações sejam transferidas de um elemento para outro em sua totalidade. Existem três classificações quanto à aderência:

- contrapiso aderido: contrapiso efetivamente integrado à base, ou seja, há contato efetivo do contrapiso com a laje. Para tanto, a base deve ser bem preparada, estar isenta de produtos nocivos, como óleos, graxas e poeira, ser previamente molhada, para que não absorva a água da argamassa e prejudique a hidratação do cimento e estar provida de uma ponte de aderência;
- contrapiso não-aderido: é lançado sobre uma membrana impermeável ou sobre a laje não provida de adequada aderência, que pode ser feltro betuminoso, filme plástico, entre outros;
- contrapiso flutuante: é lançado sobre uma camada intermediária de separação, de isolamento ou impermeável, de um material resiliente que pode ser composto por mantas, emulsões, materiais granulares etc., que o desvincula dos elementos estruturais, minimizando os efeitos oriundos de vibrações introduzidas pelas solicitações de uso.

É recomendada a utilização de contrapiso aderido com espessura entre 2 e 4 cm. Uma espessura acima do limite superior pode originar um contrapiso oco, que pode perder a aderência com a base. O contrapiso não aderido deve apresentar espessura mínima de 3,5 cm. Para espessura total superior a 5 cm, o contrapiso deve ser executado com camadas de enchimento. O contrapiso flutuante pode variar de 4 a 7 cm de espessura em função da compressibilidade da camada de isolamento utilizada (BARROS, 1991).

Para a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015), o contrapiso flutuante (Figura 3) é mais efetivo para isolamento ao ruído de impacto, tendo pouco efeito no isolamento ao ruído aéreo. Para fabricação dos elementos resilientes, geralmente são utilizados os seguintes materiais: borracha reciclada de pneu, cortiça, emulsões asfálticas, espuma de polietileno, lã mineral, lã de pet, mantas elastoméricas, sistemas mistos etc.

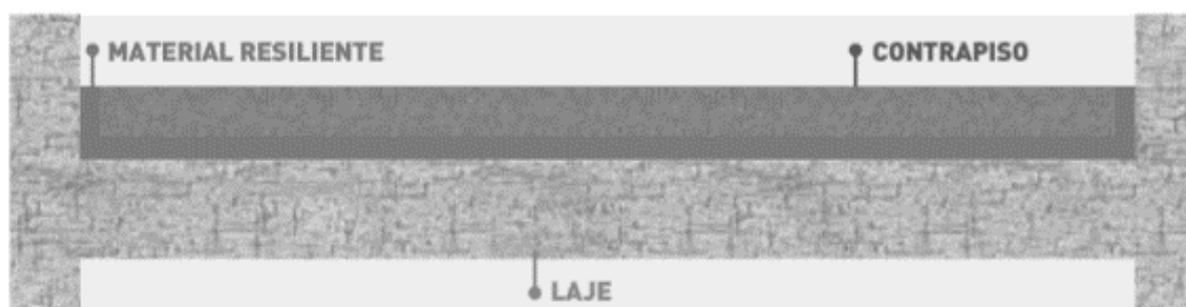


Figura 3 - Contrapiso flutuante sobre laje

Fonte: PROACÚSTICA, 2015

Para Cichinelli (2009), o contrapiso é uma camada de argamassa lançada sobre uma base (laje estrutural ou lastro do concreto) para regularização. A espessura varia de 2 a 6 cm, dependendo da função. Para contrapisos internos de edifícios habitacionais e comerciais, utilizam-se 200 a 250 kg/m³ de argamassa. As dosagens de cimento e areia são de 1:5 a 1:7 (em média), mas a dosagem de 1:6 é a mais usual.

Para a execução do contrapiso sobre a base deve-se aguardar pelo menos 28 dias da cura, ou 7 dias de terminada a camada anterior de regularização, tempo onde a maior parte da retração ocorre, diminuindo assim os efeitos negativos de movimentação da estrutura. A base deve estar completamente limpa e lavada, devendo ser removidos todos os restos e crostas de argamassa ou concreto eventualmente existentes, usando ponteiro e marreta, se necessário. As instalações elétricas e hidráulicas do piso devem estar executadas e testadas.

Segundo Cichinelli (2009), esses são os passos que devem ser seguidos para a execução de uma boa base de regularização (contrapiso aderido), eles estão expostos na Figura 4:

- fazer a transferência de nível com o auxílio de um nível de mangueira ou nível a laser, a partir do nível de referência;
- com o auxílio de uma trena, marcar a altura do contrapiso;
- sobre a superfície limpa, jogar uma mistura de água e branco na área onde as taliscas serão executadas;
- polvilhar cimento sobre a mistura e com a ajuda de uma vassoura, escovar a massa;
- colocar a argamassa sobre a superfície;
- depois de nivelar a argamassa, colocar a talisca (um pedaço de cerâmica ou madeira);
- com o auxílio da trena e prevendo o caimento no sentido dos ralos, conforme o projeto, conferir a altura do nível do contrapiso. Fazer as outras taliscas com distâncias entre 1,5 e 2,0 m entre elas para depois fazer as guias (fios esticados), de forma semelhante ao feito para o emboço;
- polvilhar cimento sobre toda a base, na quantidade de 0,5 kg de cimento por m²;
- jogar a farofa do contrapiso. Com a ajuda de uma enxada, preencher os intervalos entre as taliscas;
- a argamassa deve ser compactada com um soquete de madeira. Esse processo deve ser feito até que a argamassa de contrapiso chegue ao nível marcado com a guia;
- após compactar a argamassa, sarrafear com movimento de vai e vem apoiando a régua de alumínio nas taliscas;
- desempenar a massa, alisando-a e dando o acabamento no trabalho com o auxílio de uma desempenadeira de madeira ou de alumínio;

– depois de aproximadamente seis horas de cura, o contrapiso está pronto para receber o revestimento final.



Figura 4 - Execução de um contrapiso

Fonte: Adaptado de CICHINELLI, 2009

A qualidade do serviço depende também da perfeita aderência entre o contrapiso e a camada anterior, seja à base de concreto ou outra camada intermediária. Esta aderência entre as camadas é proporcionada pela ponte de aderência alcançada através de uma pasta de cimento e areia (1:1) lançada na base, imediatamente antes da execução do contrapiso, e espalhada energicamente, com vassouras de pelo duro, ou pelo polvilhamento de cimento sobre a base umedecida.

Os caimentos podem ser realizados anteriormente, na camada de regularização, ou na etapa de execução do contrapiso. É necessário prever as juntas de movimentação e dessolidarização, preenchendo-as com elementos removíveis, como ripas de madeira, ou elementos permanentes de enchimento, como tiras de poliuretano expandido (tarugos).

Borges *et al.* (2018) propuseram o uso de resíduos de EVA (Etil Vinil Acetato) e casca de arroz em contrapisos de 3 e 5 cm de espessuras, para diminuir o ruído de impacto, substituindo os agregados naturais em 25, 50 e 75%. Os resultados mostraram que a adição desses resíduos à argamassa reduziu a densidade da mistura, com benefícios, portanto, na redução de carga na estrutura. A rigidez dinâmica determinada para os materiais estudados foi consistente com a espessura e a quantidade de resíduos, onde valores decrescentes são função da espessura e inversamente proporcional ao teor de resíduos incorporados na argamassa. O contrapiso é identificado como uma oportunidade de usar esses resíduos com o benefício de reduzir a carga total da construção e ganhos em termos de desempenho acústico, sem usar novas matérias-primas e reduzir o impacto de outros setores industriais. Os contrapisos com percentual de 75% de uso de EVA destacaram-se como a amostra com maior potencial para atingir um desempenho acústico satisfatório (BORGES *et al.*, 2018).

2.2.2 Parâmetros para argamassa de contrapiso

Não existe uma norma brasileira especificando os parâmetros mínimos requeridos para argamassas usadas em contrapisos. Existem algumas marcas de argamassas industrializadas próprias para serem utilizadas em contrapisos. Um compilado de algumas delas está na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades de algumas marcas de argamassas industrializadas

Marca	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Rendimento (kg/m ²)	Espessura (cm)	Resistência à aderência aos 28 dias (MPa)
PRECON	1600 a 2000	10	20	> 2	-
VALEMASSA	1880	11	20	-	0,3
QUARTZOLIT - WEBER	1700	10	20	2 a 5	0,5
MATRIX - VOTORANTIM	-	13	20	2 a 4	-
MASSARETI	1600 a 2000	8	20 a 25	-	0,3
QUIMIFLEX	1600 a 2000	8	16	-	-

Fonte: Autoria própria

A NBR 13281 (ABNT, 2005) especifica os requisitos exigidos para argamassas utilizadas em assentamento e revestimento de paredes e tetos. Os requisitos para as classes mais solicitadas ou para os ambientes mais agressivos, estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades de argamassas de assentamento e revestimento

Propriedades	Classe	Valores mínimos	Método de ensaio
Resistência à compressão (MPa)	P6	> 8,0	ABNT NBR 13279
Densidade de massa no estafo endurecido (kg/m ³)	M6	> 1800	ABNT NBR 13280
Resistência à tração na flexão (MPa)	R6	> 3,5	ABNT NBR 13279
Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	D6	> 2000	ABNT NBR 13278
Retenção de água (%)	U6	95 a 100	ABNT NBR 13277
Resistência de aderência à tração	A3	≥ 0,3	ABNT NBR 15258

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 13281, 2005

2.3 Pneus

O IBAMA (2018) definiu pneu como um componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que, quando montado em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sobre pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo.

Ainda segundo o BNDES (1998), num veículo automotor, as principais funções dos pneus são: suportar carga, assegurar a transmissão da potência automotriz, garantir dirigibilidade e respostas eficientes nas freadas e acelerações e contribuir, junto com a suspensão, para o conforto dos ocupantes.

Um pneu é construído, basicamente, com uma mistura de borracha natural e de borrachas sintéticas. A adição de negro de fumo confere à borracha propriedades de resistência mecânica e diante a ação de raios ultravioleta, durabilidade e desempenho. A mistura é espalmada num molde e, para a vulcanização, feita a uma temperatura de 120 a 160 °C, utiliza-se o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e antioxidantes. Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial, uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça e

a mistura de borracha e elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores (ANDRIETTA, 2002). A Figura 5 e a Tabela 4 contêm as composições médias de um pneu.

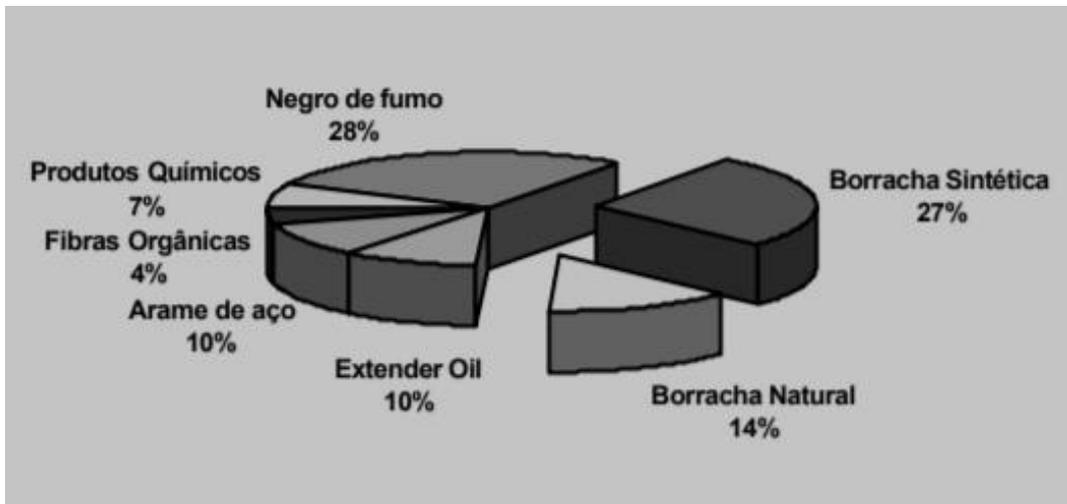


Figura 5 - Composição de pneus

Fonte: BNDES, 1998

Tabela 4 - Composição química média de um pneu

Elemento/Composto	%
Carbono	70,0
Ferro (Fe)	15,0
Hidrogênio (H)	7,0
Enxofre (S)	1,3
Óxido de Zinco (ZnO)	1,2
Outros	5,5

Fonte: ANDRIETTA, 2002

A borracha natural (Isopreno C_5H_8) é obtida a partir do látex, que é um polímero extraído de algumas espécies vegetais. Dentre elas, a mais importante é a seringueira (*Hevea Brasiliensis*), árvore nativa da Amazônia (SINDIPNEUS, 2012).

Desenvolvida a partir de 1940, a borracha sintética é um elastômero derivado do petróleo. Em geral, proporciona boas propriedades de tração sem comprometer a resistência a abrasão (SINDIPNEUS, 2012).

O negro de fumo é um material essencialmente constituído por carbono elementar sob forma de partículas aproximadamente esféricas, de diâmetro máximo inferior a $1\mu\text{m}$ e são produzidos pela conversão de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos em carbono elementar e hidrogénio, por combustão parcial ou por decomposição térmica (SINDIPNEUS, 2012).

Dos 15 milhões de toneladas de borracha (natural e sintética) consumidas anualmente no mundo, aproximadamente 9 milhões de toneladas se destinam aos pneumáticos. Esta situação se verifica também no Brasil, onde mais de 50% do total de borracha consumida é utilizada na indústria de pneumáticos (BNDES, 1998).

Segundo o INMETRO (2015), através da portaria nº 554, o pneu deve ser substituído quando os sulcos atingirem a profundidade de 1,6 mm. A regra vale também para caso somente um dos sulcos do pneu atingir esta medida. Esta medida pode ser detectada quando o desgaste dos blocos da banda de rodagem atingir a altura dos ressaltos posicionados nos sulcos dos pneus, chamados de T.W.I. (*Tread Wear Indicators*), igualmente espaçados e dispostos ao longo do perímetro da banda de rodagem.

Quando um pneu não possui mais nenhuma possibilidade de reforma ou aproveitamento, ele se torna um pneu inservível devendo então seguir para a reciclagem.

2.3.1 Pneus inservíveis

Quando um pneu atinge o limite de sua vida útil e apresenta danos irreparáveis em sua estrutura, não se prestando mais à rodagem ou à reforma, se torna um pneu inservível (Figura 6). Segundo Nacif *et al.* (2013) apenas 10% dos pneus gerados no Brasil de fato são reciclados.



Figura 6 - Pneus inservíveis

Fonte: IBAMA, 2018

O IBAMA (2018), através do Relatório Pneumáticos, visa atender ao disposto no Artigo 16 da Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009, que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos.

O referido relatório analisou as informações de 18 empresas fabricantes e 489 importadoras de pneus novos. Cabe enfatizar que essas informações têm como fonte os dados declarados pelas empresas fabricantes e são referentes ao cumprimento da meta de destinação nacional de pneus inservíveis.

A meta de destinação a ser cumprida é calculada a partir da conversão em peso dos pneus comercializados no mercado de reposição, considerando o desconto de 30% em peso pelo fator de desgaste do pneu novo (IBAMA, 2018). O mercado de reposição de pneus é resultante da equação a seguir.

$$MR = P + I - E - EO \quad \text{Equação 1}$$

Com:

MR = Mercado de reposição;

P = Total de pneu produzidos;

I = Total de pneus importados;

E = Total de pneus exportados;

EO = Total de pneus que equipam veículos novos.

Em relação ao ano de 2017, a Tabela 5 discrimina os valores, em toneladas, dos tipos e do total de pneus que foram fabricados, importados, exportados e enviados a montadoras no Brasil.

Tabela 5 - Total de pneus produzidos, importados e exportados (2017)

Descrição	Fabricado (t)	Importado (t)	Exportado (t)	Enviado a montadoras (t)
Pneus novos para automóveis de passageiros	335.966,42	126.419,12	95.809,75	97.836,75
Pneus novos para ônibus ou caminhões	567.049,25	78.116,07	115.757,29	78.326,43
Pneus novos para aviões	0	695,69	33,7	15,19
Pneus novos para motocicletas	52.429,87	4.060,40	22.033,68	5.863,24
Pneus novos para veículo agrícolas e florestais	65.049,59	13.713,17	9.928,34	33.797,70
Pneus novos para veículos da construção civil	44.917,66	14.501,07	12.244,87	8.253,63
Outros pneus novos	11.389,05	23.617,15	16.227,21	1.933,27
Total	1.076.801,84	261.122,67	272.034,84	226.026,21

Fonte: Adaptado de IBAMA, 2018

A partir da equação de mercado de reposição de pneus apresentada anteriormente, a quantidade total de pneus novos colocados no mercado de reposição no ano de 2017 são 60.424.080 unidades, o que equivale a 839.863,47 toneladas. E, sendo assim, a meta de destinação nacional calculada para o ano de 2017 foi de 587.904,43 toneladas.

O IBAMA (2018) estabelece regras aos fabricantes e importadores de pneus, sendo elas:

- para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras devem dar destinação adequada a um pneu inservível (relação 1:1);
- veda a destinação final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos d'água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto;
- determina aos fabricantes e importadores de pneus novos com peso unitário superior a 2 kg a coletarem e destinarem adequadamente os pneus inservíveis existentes no território nacional;
- deve haver a implantação de pontos de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios com população superior a 100 mil habitantes.

Pontos de coleta são locais definidos pelos fabricantes e importadores de pneus para receber e armazenar provisoriamente os pneus inservíveis. Na Figura 7 tem-se a quantidade de pontos de coleta nos estados brasileiros.

Segundo o IBAMA (2018), o estado do Rio de Janeiro tem a capacidade total de coleta de aproximadamente 114 mil unidades de pneus inservíveis. A capacidade de coleta de cada município do referido estado encontra-se na Tabela 6.



Figura 7 - Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados por estado (2017)

Fonte: IBAMA, 2018

Tabela 6 - Capacidade de coleta de pneus inservíveis nos municípios do Rio de Janeiro

Município	Capacidade (unidades)	Município	Capacidade (unidades)	Município	Capacidade (unidades)
Angra dos Reis	2350	Macaé	2400	Resende	4075
Araruama	2300	Magé	2100	Rio Bonito	2000
Armação dos Búzios	2000	Maricá	2000	Rio das Ostras	2300
Barra Mansa	6600	Mesquita	2100	Rio de Janeiro	5300
Belford Roxo	2500	Natividade	2000	São Gonçalo	6700
Cabo Frio	4600	Nilópolis	2300	São João de Meriti	4400
Cachoeiras de Macacu	2000	Niterói	2400	São Pedro da Aldeia	2000
Campos dos Goytacazes	4400	Nova Friburgo	2375	Sapucaia	2000
Casimiro de Abreu	2000	Nova Iguaçu	2400	Saquarema	2000
Duque de Caxias	2400	Paracambi	2000	Tanguá	2000
Iguaba Grande	4000	Petrópolis	2350	Teresópolis	4400
Itaboraí	2300	Piraí	2000	Total	113850
Itaguaí	2400	Queimados	2300		

Fonte: Adaptado de IBAMA, 2018

Os procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) (Tabela 7), bem como a quantidade por região brasileira declaradas no Relatório de Pneumáticos em 2017 Tabela 8 são apresentadas a seguir.

Tabela 7 - Tecnologias de destinação final de pneus inservíveis

Tecnologia	Conceito	Destinação (t)
Coprocessamento	Utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e como fonte de elementos metálicos.	274.815,07
Laminação	Processo de fabricação de artefatos de borracha.	215.604,04
Granulação	Processo industrial de fabricação de borracha moída, em diferente granulometria, com separação e aproveitamento do aço.	81.625,74
Pirólise	Processo de decomposição térmica da borracha conduzido na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo.	13.208,46

Fonte: Adaptado de IBAMA, 2018

Tabela 8 - Quantidade de pneus inservíveis destinados adequadamente por região brasileira

Região	Destinação (t)	Percentual
Sudeste	332.610,44	56,83%
Sul	123.920,21	21,17%
Centro-Oeste	57.195,10	9,77%
Nordeste	52.955,18	9,05%
Norte	18.571,38	3,17%
Total	585.252,32	100,00%

Fonte: IBAMA, 2018

Das 585.252,32 toneladas de pneus inservíveis do Brasil que receberam destinação final pelas empresas fabricantes e importadoras, 56,83% é proveniente somente da região Sudeste e 36,84% é destinado à tecnologia de granulação, totalizando 215.604,04 toneladas de borracha moída disponíveis para diversas utilizações (IBAMA, 2018).

As aplicações de pneus inservíveis mais comuns encontradas no mercado são: aplicação na composição do asfalto, disposição em muros de contenção ou arrimo, elemento aerador de solos compactados, combustíveis, tapetes, pisos, entre outros.

Embora existam resoluções que proíbam as destinações finais que degradem o meio ambiente e da fiscalização por parte do IBAMA, boa parte dos pneus inservíveis ainda acabam

parando nos lixões, na beira de rios e estradas, e até no quintal das casas, onde podem acumular água e atrair insetos transmissores de doenças. Esse quantitativo de material descartado inadequadamente não é contabilizado pelos órgãos normativos.

A utilização de resíduos de pneus como material de construção é uma maneira de diversificar e aumentar a oferta de materiais de construção, viabilizando eventualmente reduções de preço, gerando benefícios sociais e encontrando uma nova utilização para esse resíduo que se encontra em abundância no Brasil. O uso de borracha como um agregado na argamassa promove a destinação correta desse resíduo, tornando-se inerte e promovendo a higiene do meio ambiente (ANGELIN *et al.*, 2019).

2.3.2 Histórico de estudos da borracha aplicada em argamassas e concretos

Cruz *et al.* (2002) avaliou o efeito da adição de resíduo recauchutagem de pneus nas propriedades mecânicas e na densidade do concreto, em substituição ao agregado graúdo em proporções variando de 0% (referência) até 100% em volume. Foram realizados ensaios de tração na flexão em quatro pontos, compressão e de densidade dos concretos endurecidos. O concreto com substituição de 100% resultou em que queda de 85% na resistência à tração em relação ao concreto de referência. Outros efeitos decorrentes dessas substituições, como a redução da densidade e a possibilidade de melhoria nas propriedades de isolamento térmico e acústico, foram levados em consideração, e concluiu-se que, apesar de uma já esperada redução da resistência mecânica, é possível, com o uso de tecnologias apropriadas, obter concretos de qualidade adequada para muitas aplicações no ramo da construção civil.

Albuquerque *et al.* (2008) avaliaram o efeito da adição de borracha de pneus inservíveis não tratados e tratados superficialmente com uma mistura polimérica acrílica em substituição de 2%, 4%, 6% 8% e 10% em volume de agregado. As amostras foram investigadas sobre as propriedades mecânicas e físicas, incluindo permeabilidade. Os resultados mostraram que misturas com borracha de pneu tratada e não tratada têm desempenho semelhantes e que o teor de borracha e o tratamento da superfície influenciam significativamente nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. Ainda concluíram que o uso de borracha de pneus no concreto tende a reduzir a permeabilidade à água e que há uma maior capacidade de absorção de energia quando comparado ao concreto convencional. Esse comportamento do material é atribuído ao desempenho da borracha de pneu, que suporta grande deformação antes da fratura do concreto.

Verzegnassi *et al.* (2011) estudaram as propriedades mecânicas em concreto convencional com adição de borracha reciclada de pneu, com adição de 1%, 3% e 6% de borracha em relação à massa de cimento. Foram realizados ensaios de resistência à

compressão, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas à tração, das dosagens com adição de borracha, possuem perdas pequenas de resistência em relação as observadas para a resistência à compressão, havendo até uma melhora de desempenho na tração por compressão diametral, constatando que os concretos com borracha tendem a absorver mais energia quando submetidos aos esforços de tração.

Canova *et al.* (2007) avaliaram uma argamassa de revestimento com resíduos de pneus inservíveis, produzida com cimento, cal virgem e areia, na dosagem 1:1,5:9 (em volume) e adição de pó de borracha moída, nas proporções 0, 6, 8, 10 e 12% do volume de agregado. Os autores avaliaram a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água no estado plástico e em corpos de prova cilíndricos, a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação estática e a absorção de água por imersão no estado endurecido; e a resistência de aderência à tração e a fissuração em corpos de prova aplicados sobre substrato. Os resultados mostraram que a argamassa com resíduo apresentou menores incidências de fissuras no revestimento, redução no módulo e na resistência e aumento no teor de ar incorporado. Eles também concluíram que, proporcionalmente ao aumento das adições de pó de borracha na argamassa, houve uma queda nas propriedades mecânicas, isto ocorreu em função do aumento no teor de ar incorporado que o resíduo gera na argamassa, devido a sua baixa massa específica.

Wongsa *et al.* (2018) estudaram as propriedades mecânicas e térmicas da argamassa geopolimérica incorporando 100% de borracha triturada de pneus reciclados como agregado. A cinza volante foi ativada por soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio. A trabalhabilidade, resistências à compressão e à flexão, densidade, porosidade, absorção de água, velocidade de pulso ultrassônico e condutividade térmica das misturas foram medidos. Os resultados indicaram que a substituição da areia por borracha triturada reduziu a resistência à compressão da argamassa geopolimérica significativamente. A densidade e a condutividade térmica das argamassas contendo 100% de borracha foram, em média, 42% e 79%, respectivamente, inferiores às argamassas de controle. Eles concluíram que a argamassa geopolimérica desenvolvida contendo borracha triturada pode ser usada para fabricar tijolos/blocos, que são ecologicamente corretos, mais leves e proporcionam melhor desempenho térmico do que tijolos/blocos convencionais.

Fazzan *et al.* (2016) analisaram a utilização de fibras de borracha de pneu na produção de concretos estruturais, avaliando as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, massa específica e teor de ar incorporado. Foram elaboradas as dosagens do concreto de referência

e com substituição de 10% de resíduo de borracha em relação ao volume de agregado miúdo. Os resultados obtidos mostraram que houve um ganho das propriedades mecânicas para as misturas constituídas de borracha e isso também se deve ao fato de o método de dosagem levar a um maior teor de cimento e ao uso do superplastificante nessas misturas. Eles ainda concluíram que inclusão da borracha nos concretos causa redução da absorção de água, sendo essa redução de aproximadamente 53,7% em relação as dosagens de referência. Segundo os autores, em função da borracha atuar como poros fechados no interior dos concretos, já que sua taxa de absorção é nula, a adição do resíduo serve como uma forma de aumentar a sua durabilidade. Foi observada uma queda de 10,4% nos valores de massa específica das misturas de concreto constituídas de borracha, considerando a baixa massa específica da borracha em relação aos demais materiais. Foi constatado também que as dosagens com resíduo de borracha apresentaram aumento nos valores de teor de ar incorporado. Por fim, eles evidenciaram, portanto, a viabilidade de utilização dos resíduos de borracha de pneu na elaboração de concretos estruturais.

Son *et al.* (2011) analisaram a deformabilidade e a capacidade de absorção de energia em pilares de concreto armado constituídos de resíduo de borracha de pneu. Os concretos foram elaborados utilizando dois diferentes tamanhos de partículas de borracha de pneus (0,6 mm e 1 mm), nas proporções de 0,5% e 1% de borracha em relação ao peso total de agregados (correspondente a 2,7% e 5,4% em volume, respectivamente), para se produzir concretos com resistências à compressão de 24 e 28 MPa. Na análise dos concretos, foram verificadas reduções de 12% a 22% da resistência à compressão para as dosagens com resíduo, em relação as dosagens convencionais. Os resultados também mostraram reduções de 10 a 15% nos valores de módulo de elasticidade dos concretos com borracha.

Nacif *et al.* (2013) investigaram o efeito da incorporação de partículas de borracha em composições cimentícias sem adição de partículas de sílica. Foram realizados estudos a respeito da influência do tamanho das partículas de borracha (de 0,84 a 0,58 mm e de 0,28 a 0,18 mm), da proporção de borracha na mistura (5, 15 e 30%) e da variação da relação água/cimento (0,35 e 0,50). Os materiais foram caracterizados por densidade aparente, porosidade, resistência à compressão, resistência à flexão e análise microestrutural. As interações do tamanho das partículas de borracha, da proporção de borracha na mistura e da relação água/cimento afetaram significativamente a densidade e a resistência à compressão das misturas. A relação água/cimento menor levou a maiores resistências (para proporções de borracha e tamanhos de partículas iguais); maiores proporções de borracha na mistura levaram a menores resistências; quanto maior a granulometria da borracha, menores as resistências. A porosidade aparente foi influenciada principalmente pelo tamanho da partícula de borracha. As misturas fabricadas com partículas maiores possuem porosidade aparente 81% maior do que as misturas com partículas de borracha menores (Figura 8). A quantidade

de poros e grãos de cimento não hidratados formados ao redor das partículas maiores de borracha (0,84 - 0,53 mm) foram maiores do que os em torno das partículas menores (0,28 mm – 0,18 mm). Nacif *et al.* (2013) explicaram que isso ocorreu pela variação do fator de empacotamento, já que partículas menores exibem uma forma esférica e, conseqüentemente, alcançam um melhor fator de empacotamento.

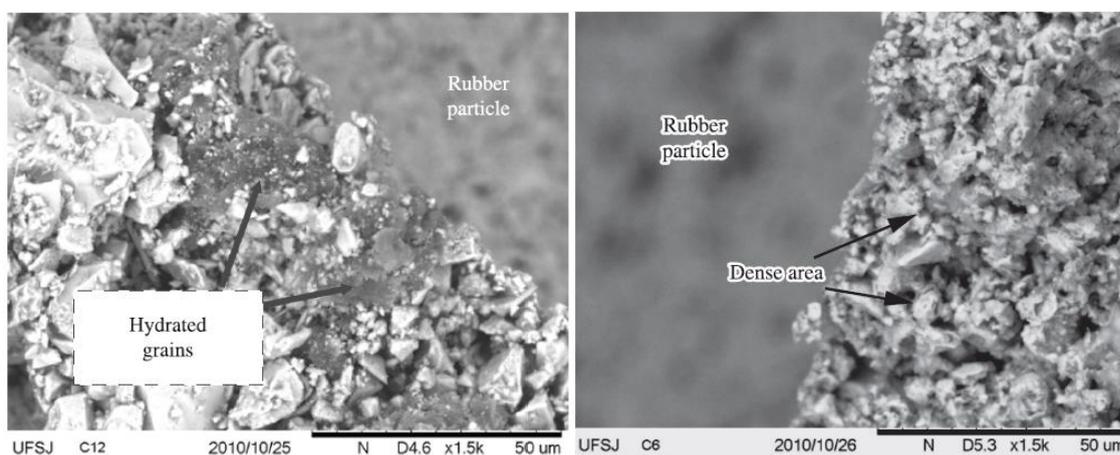


Figura 8 - MEV das misturas contendo 30% de borracha: esquerda: partículas menores; direita: partículas maiores

Fonte: NACIF *et al.*, (2013)

Da mesma forma, quando a proporção de borracha foi aumentada, a densidade aparente das misturas diminuiu devido à menor densidade da borracha em comparação com a fase da matriz cimentícia. Nacif *et al.* (2013) afirmaram que as densidades mais baixas da mistura são vantajosas nos isolamentos térmico e acústico. Houve uma diminuição na densidade quando se aumentou a relação a/c. Esse aumento no teor de água proporciona um aumento na quantidade de poros formados pelo excesso de água no sistema.

Segre e Joeques (2000) estudaram a modificação superficial da borracha de pneu para aumentar sua adesão à pasta de cimento. As superfícies das partículas foram tratadas com soluções aquosas de NaOH por 20 minutos. Microscopia eletrônica de varredura, absorção de água, densidade, resistência à flexão, resistência à compressão, resistência à abrasão, módulo de elasticidade e energia de fratura foram realizados utilizando corpos de prova (relação água / cimento = 0,36) contendo 10% de borracha tratada com NaOH e 10% de borracha natural. Os resultados da energia de fratura e de resistências à compressão e à flexão mostraram que a adição de partículas de borracha melhora a tenacidade e reduz a porosidade das amostras. O MEV (Figura 9) mostra que o tratamento de superfície com NaOH aumenta a adesão da borracha à matriz. O uso de partículas de borracha de pneu tratadas,

como adição, em materiais à base de cimento, é promissor para aplicações como calçadas ou na construção de estradas.

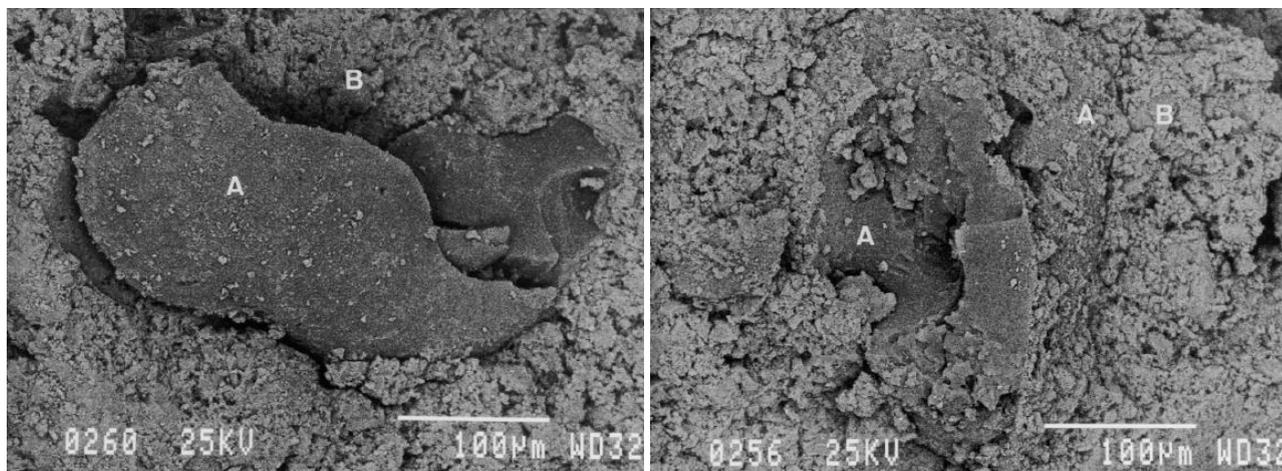


Figura 9 - MEV das argamassas com pó de borracha natural (esquerda) e com pó de borracha tratada com NaOH (direita)

Fonte: Adaptado de SEGRE e JOEKES, 2000

2.4 Ondas sonoras

Ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar. Existem dois tipos de ondas mecânicas: as ondas transversais, nas quais as oscilações são perpendiculares à direção de propagação, e as ondas longitudinais, em que as oscilações acontecem na direção de propagação de onda, como é o caso de uma onda sonora (TIPLER e MOSCA, 2006).

Na Figura 10, uma fonte sonora emite ondas sonoras em todas as direções. As frentes de onda, representadas por circunferências completas ou parciais em um desenho bidimensional, e os raios indicam a direção de propagação e o espalhamento das ondas sonoras.

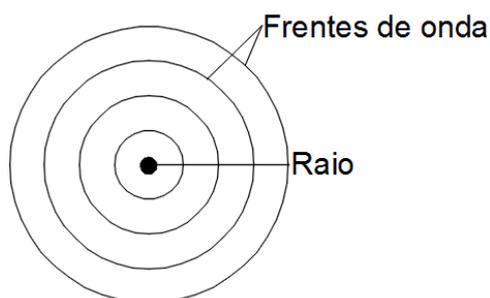


Figura 10 – Ondas sonoras

Fonte: Autoria própria

O som consiste em um fenômeno acústico composto pela propagação de ondas sonoras produzidas por uma fonte que vibra por um meio compressível. O ruído consiste no resultado do som com características específicas, como a intensidade e continuidade, independente da fonte sonora e do meio de propagação, e que causa uma interpretação humana de desconforto (CABRAL, 2012).

A velocidade do som depende do meio em que ocorre a propagação (Tabela 9) e é dada pela seguinte equação:

$$V = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$$

Equação 2

Com:

V = velocidade do som (m/s);

β = módulo de elasticidade volumétrico do meio (N/m²);

ρ = densidade do meio (kg/m³).

Tabela 9 - Velocidade do som para diferentes meios de propagação

Meio	Velocidade (m/s)
Ar (0°C)	331
Ar (20°C)	343
Hélio	965
Hidrogênio	1284
Água (20°C)	1482
Água salgada (20°C)	1522
Aço	5941
Alumínio	6420
Granito	6000
Borracha	1550

Fonte: Adaptado de HALLIDAY *et al.*, 2009

A intensidade de uma onda sonora em uma superfície é a taxa média por unidade de área com a qual a energia contida na onda atravessa a superfície ou é absorvida pela superfície, é dada pela seguinte equação:

$$I = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Com:

I = intensidade sonora (W/m^2);

P = taxa de variação com o tempo da transferência de energia (W);

A = área da superfície que intercepta o som (m^2).

A amplitude do deslocamento do tímpano no interior do ouvido humano varia cerca de 10^{-5} m, para o som mais alto tolerável, e cerca de 10^{-11} m, para o som mais fraco detectável – uma razão de 10^6 . E como a intensidade do som varia com o quadrado da amplitude, a razão entre as intensidades nesses dois limites do sistema auditivo humano é 10^{12} . Isso significa que os seres humanos podem ouvir em uma enorme faixa de intensidades (HALLIDAY *et al.*, 2009).

Assim, em vez de falar de intensidade de uma onda sonora, fala-se de nível de pressão sonora, que dimensiona o grau de sensação auditiva de uma onda sonora que é determinada pela intensidade da onda e baseada na sensibilidade do ouvido humano e por ser uma quantidade simples de ser medida. Pode ser definida como:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0} \quad \text{Equação 4}$$

Com:

β = nível de pressão sonora (dB);

dB = é abreviação de decibel, unidade de nível sonoro;

I = intensidade sonora (W/m^2);

I_0 = unidade de referência = 10^{-12} W/m^2 .

O valor I_0 foi assim escolhido, porque está próximo do limite inferior da faixa de audição humana. Para $I = I_0$, $\beta = 0$, de modo que a intensidade de referência corresponde a 0 dB. 1 dB é a menor variação que o ouvido humano pode perceber. A Tabela 10 apresenta alguns níveis sonoros para diferentes ambientes.

Tabela 10 - Alguns níveis sonoros

Som	dB
Limiar de audição	0
Conversa	60
Show de rock	110
Limiar da dor	120
Turbina a jato	130

Fonte: Adaptado de HALLIDAY *et al.*, 2009

Frequência é o número de oscilações produzidas durante o intervalo de 1 s. No Sistema Internacional de Unidades, a grandeza física que caracteriza a frequência de uma onda é dada em hertz, cujo símbolo é Hz. O ser humano ouve sons num intervalo entre os 20 e 20000 Hz, e as frequências mais importantes, ou seja, relacionadas com a conversação, encontram-se entre os 500 e os 2000 Hz (GERGES, 2000). A Figura 12 mostra a variação limiar de audição com a frequência e os contornos de audibilidade, ou seja, o ouvido não é igualmente sensível.

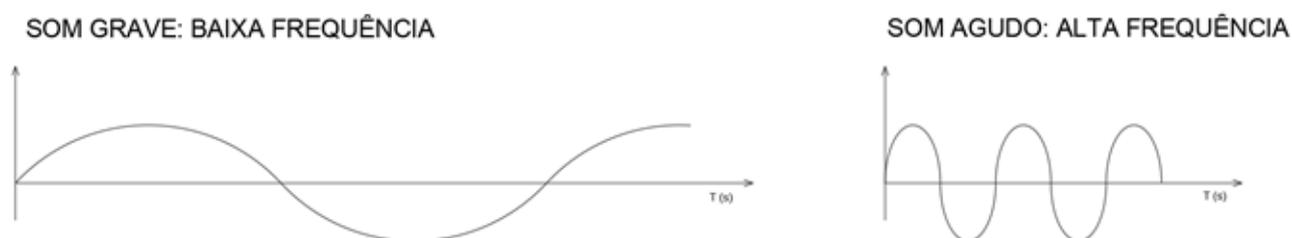


Figura 11 - Sons graves e agudos no domínio do tempo

Fonte: Autoria própria

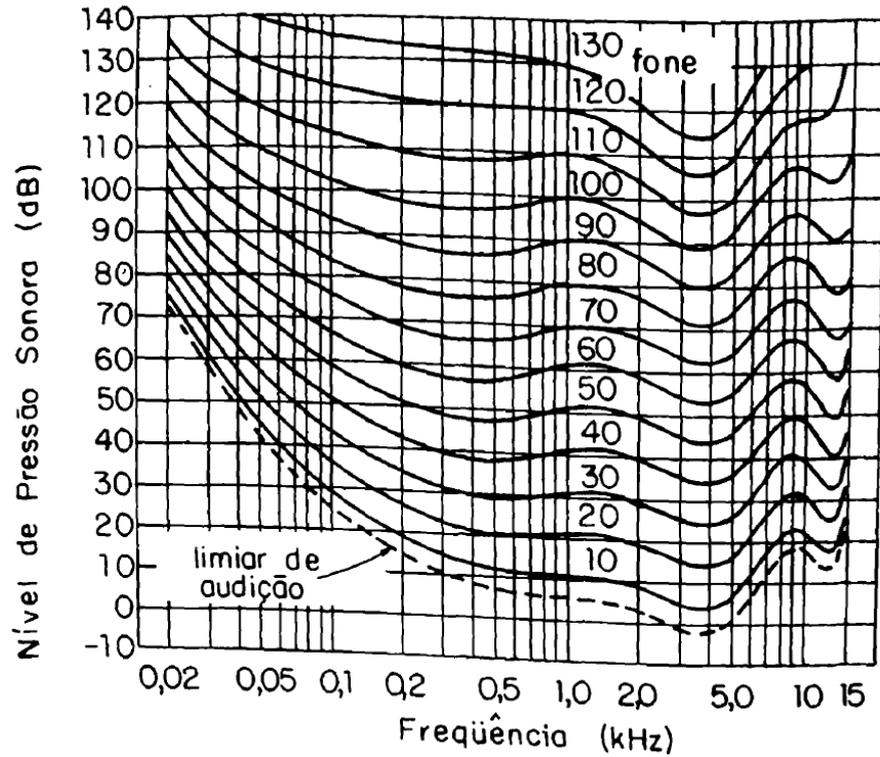


Figura 12 - Contornos padrão de audibilidade para tons puros

Fonte: GERGES, 2000

Um som dito grave é um som que possui onda de baixa frequência (Figura 11). Sons abaixo de 200 hertz são considerados graves (CABRAL, 2012). As subdivisões das faixas de frequência graves, médios e agudos estão expostas na Figura 13.

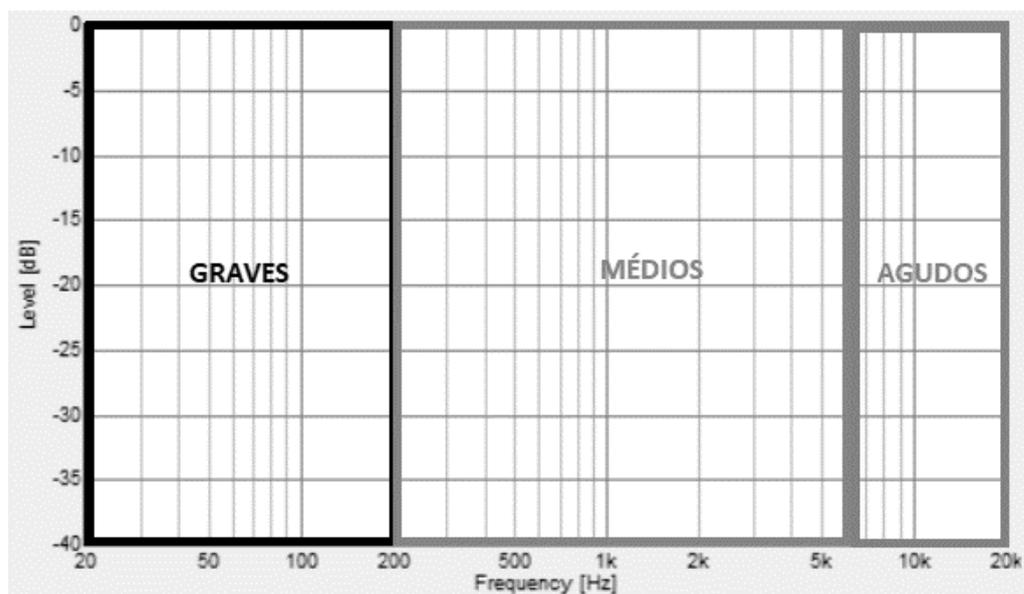


Figura 13 - Subdivisão das faixas de frequência graves, médios e agudos.

Fonte: Autoria própria

A menor distância entre dois pontos consecutivos, nos quais a perturbação se repete, é o comprimento de onda (Figura 14), sendo determinada através da seguinte equação:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{Equação 5}$$

Com:

λ = comprimento de onda (m);

V = velocidade de propagação da onda no meio (m/s);

f = frequência (Hz).

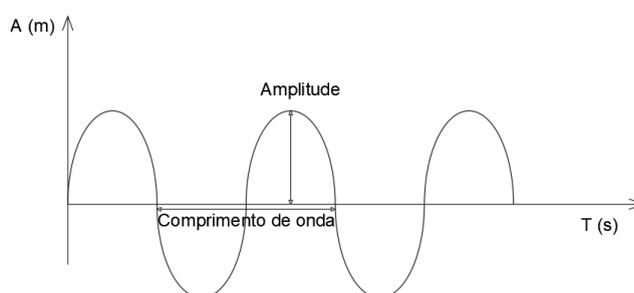


Figura 14 - Comprimento de onda (λ)

Fonte: Autoria própria

Existe uma correlação entre frequência e comprimento de onda. Essa correlação é facilmente percebida, pois quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda. Isto é, quanto maior o número de vezes que o ciclo se completa em um determinado intervalo de tempo, menor a distância que existe entre esses ciclos. Portanto, de maneira análoga, quanto menor a frequência, maior o comprimento de onda (CASTRO e RANCURA, 2018).

A senóide é a forma de onda mais elementar que compõe um som. Um som constituído por apenas uma frequência, uma só senóide, também é conhecido como som puro. Porém, dificilmente encontramos um som puro. Um som puro só existe se produzido artificialmente por um oscilador de frequências, como em alguns sintetizadores eletrônicos. O que geralmente se ouve são duas ou mais ondas que juntas formam determinado som (CARVALHO, 2006).

O ruído branco (Figura 15) é um sinal aleatório com intensidades iguais para todo o espectro de frequências, o que resulta em uma densidade espectral de potência constante.

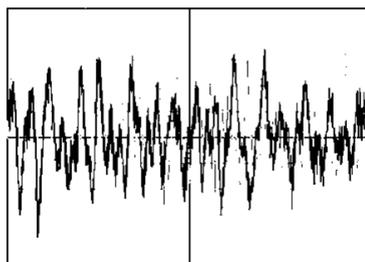


Figura 15 - Ruído branco no domínio do tempo

Fonte: Autoria própria

Ruído de impacto é o som produzido pela percussão por impacto ou atrito de corpos sólidos e transmitido sobre a superfície do piso através do ar e ruído aéreo o som produzido e transmitido através do ar (NBR 15575, 2013).

Quando se efetuam medições de níveis de pressão sonora deve-se considerar a influência do ruído de fundo, isto é, o ruído ambiental gerado por outras fontes que não o objeto de estudo. Obviamente, o ruído de fundo não deve mascarar o sinal de interesse (GERGES, 2000).

2.4.1 Isolamento acústico

A energia sonora pode ser transmitida pelo ar, ou por meio sólido, quando a propagação ocorre em uma estrutura da edificação, através de vários tipos de ondas. A Figura 16 ilustra propagações de ruído via ar e via estrutura e a Figura 18, os tipos de ondas nos sólidos.

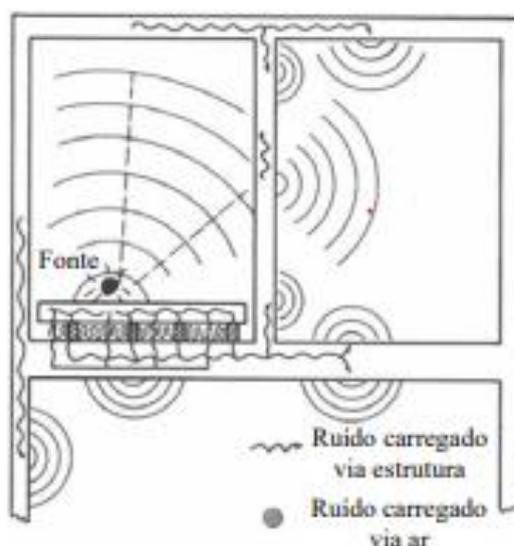


Figura 16 – Ilustração de ruído propagado no ar e na estrutura

Fonte: GERGES, 2000

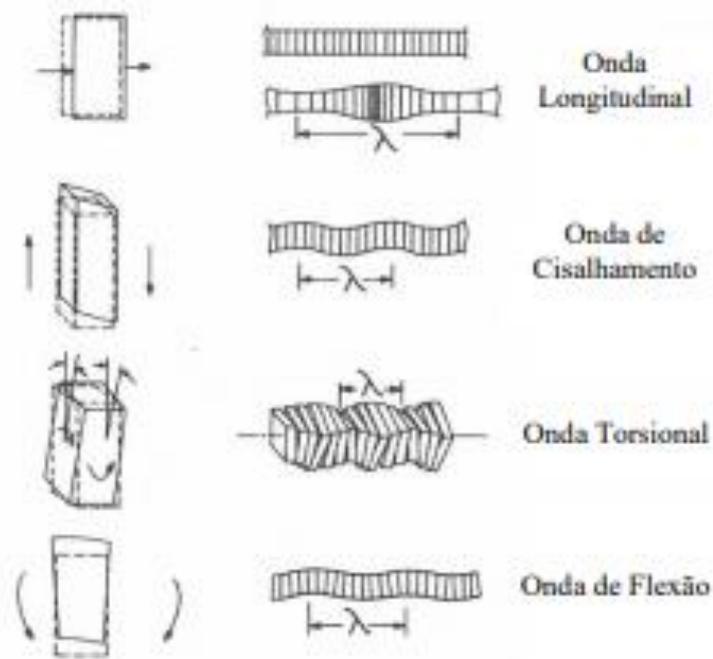


Figura 17 – Tipos de ondas nos sólidos

Fonte: GERGES, 2000

Quando uma onda sonora incidente, propagando-se em um meio, encontra um obstáculo, os fenômenos que podem ocorrer são a reflexão, a absorção pelo material constituído desse obstáculo e a transmissão do som, conforme pode ser observado na Figura 18.

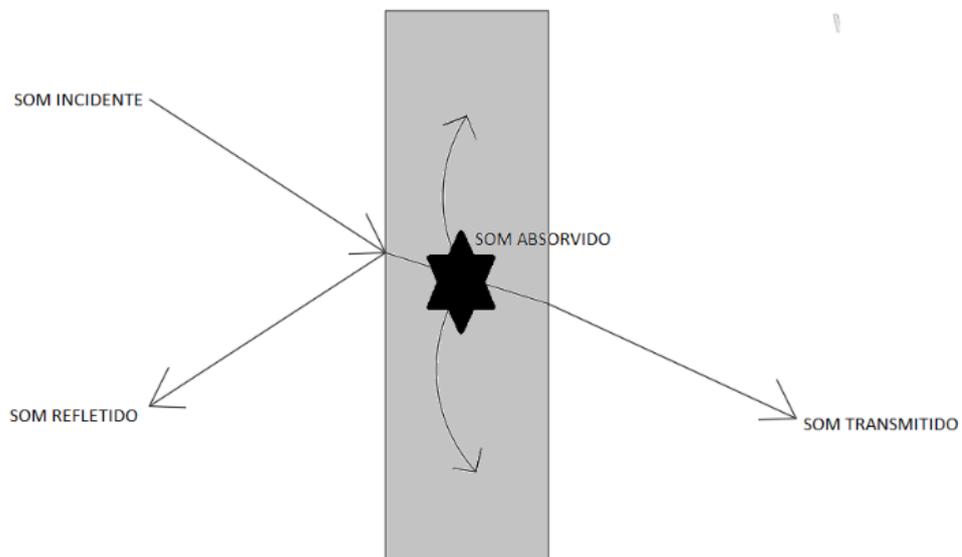


Figura 18 - Fenômenos que podem ocorrer quando uma onda encontra um obstáculo

Fonte: Autoria própria

A reflexão sonora é um fenômeno no qual a onda do som é refletida pelo obstáculo, devolvendo o som ao ambiente de origem. São exemplos de materiais refletivos: alvenaria, vidro, chumbo, concreto e madeira maciça. É este tipo de material que deve ser aplicado no exterior de recintos, de forma que o ruído não seja transmitido através das paredes para o interior (CARVALHO, 2006).

Nas diversas faixas de frequência existem parâmetros variáveis que permitem determinar o nível de ruído absorvido por um obstáculo. As características de materiais para isolamento acústico podem ser estabelecidas através da determinação da atenuação da pressão sonora, sendo que valores altos têm como significado físico uma alta absorção de energia, e pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\text{Diminuição da pressão sonora (dB)} = 10 \log \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{Equação 6}$$

Com:

α = coeficiente de absorção acústica, determinado pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\text{energia absorvida}}{\text{energia incidente}} \quad \text{Equação 7}$$

Para um material ser considerado bom absorvedor do som, eles devem ser necessariamente, macios, porosos ou fibrosos e poder ter sua superfície contornada. Em função das formas e dimensões dos poros ou das fibras desses materiais é que se explica a variação de suas absorções acústicas, conforme as faixas de frequência (HAN *et al.*, 2008).

Na

Tabela 11 apresentam-se os coeficientes de absorção do som para diversos tipos de materiais. Sendo NRC (Coeficiente de Redução de Ruído) a média aritmética dos 4 coeficientes de absorção sonora centrais, correspondentes às frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

O caso onde $\alpha_t > 1$ ocorre devido a área absorvente ter bordas livres, absorvendo mais energia sonora por segundo do que o proporcional à sua área geométrica, a diferença sendo causada pela difração do som para a área absorvente. É como se a amostra fosse maior que sua área plana.

Tabela 11 - Coeficientes de absorção sonora para diversos tipos de materiais

Material	Frequência (Hz)						NRC
	125	250	500	1000	2000	4000	
Vidro de 6 mm	0,1	0	0,04	0	0,02	0	0,02
Concreto	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
Parede de alvenaria	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,04
Vidro de 4 mm	0,3	0	0,1	0	0,05	0	0,04
Madeira	0,14		0,06		0,1		0,04
Carpete de 6 mm	0,12		0,1		0,1		0,05
Cortiça de 1,9 cm	0,09		0,06		0,21	0,22	0,07
Cortiça de 0,8 cm	0,08		0,08		0,31	0,22	0,1
Cortiça de 2,5 cm	0,08		0,37		0,3	0,47	0,17
Espuma de poliuretano de 2,5 cm	0,12		0,27		0,62	0,22	0,22
Lã de vidro de 5 cm	0,12	0,69	0,98	1,02	1,05	1,06	0,94

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2006

Além disso, a eficiência de absorção varia com a espessura e com o tipo de superfície do material (CARVALHO, 2006). Os materiais absorventes absorvem melhor os sons médios e graves em comparação as baixas frequências (sons agudos), conforme pode ser observado na Figura 19.

O fenômeno de um material absorver o som pode ser explicado em termos de conversão da energia sonora em calor. Em geral, um bom material de absorção do som possui alto grau de porosidade e coeficientes de absorção sonora próximos a 1 em uma ampla banda de frequência. Argamassas com adição de borracha são porosas (CORREDOR-BEDOYA *et al.*, 2017). Segundo Angelin *et al.* (2019) a velocidade do som na argamassa diminui com a adição de borracha, enquanto o coeficiente de atenuação sonora aumenta.

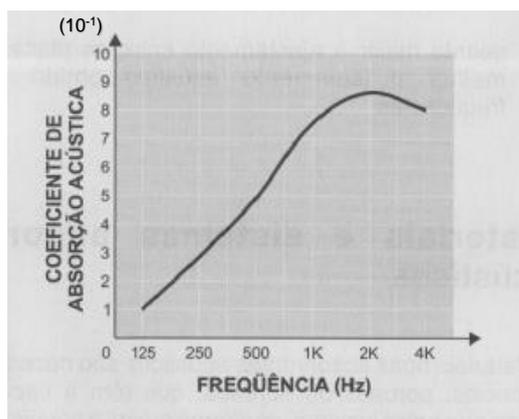


Figura 19 - Variação do coeficiente de absorção sonora em função da frequência para um material hipotético

Fonte: adaptado de CARVALHO, 2006

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece critérios de desempenho em edifícios habitacionais em relação aos ruídos aéreo e de impacto para fachadas, pisos e paredes internas, fornecendo valores mínimos de desempenho acústico para o conforto de seus usuários (Tabela 12 e Tabela 13). Sendo $D_{nT,w}$ a diferença padronizada de nível ponderada; e $L'_{nT,w}$ o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado.

Tabela 12 - Nível de desempenho acústico mínimo em relação ao ruído de impacto

Elemento	$L'_{nT,w}$ (dB)
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas	≤80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas	≤55

Fonte: ABNT NBR 15575, 2013

Tabela 13 - Critério de diferença padronizada de nível ponderada em relação ao ruído aéreo

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	≥40
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo	≥45

Fonte: ABNT NBR 15575, 2013

Para encontrar o valor de $D_{nT,w}$, deve-se mover a curva de valores de referência tabelados (Tabela 14) para cima ou para baixo em incrementos de 1 dB em direção à curva medida até que a soma dos desvios desfavoráveis ou deficiências seja próxima a 32 dB, mas não superior a esse valor. Um desvio desfavorável ou deficiência em uma frequência particular equivale à diferença entre o valor medido e o valor de referência, quando o valor medido é menor que o valor de referência.

O valor único ou índice ponderado de isolamento sonoro aéreo será o valor, em dB, da curva de referência em 500 Hz, após movê-la de acordo com o procedimento descrito.

Tabela 14 - Valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava

Frequência (Hz)	100	250	500	1000	2000	3000
Valor de referência (dB)	33	45	52	55	56	56

Fonte: ISO 717-1, 2013

Tutikian *et al.* (2017) desenvolveram uma argamassa leve, a partir da incorporação de EVA, a ser utilizada como contrapiso para isolamento acústico. Para tanto, foram feitos estudos por meio de ensaios de resistência à compressão e à tração, bem como nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, realizado em câmara normatizada. Foram desenvolvidas cinco dosagens, com proporções de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de substituição do agregado miúdo por EVA, além do contrapiso convencional. Foram moldadas placas de 1 m² de contrapiso leve, e uma amostra representativa do tamanho da laje com 16 m², as quais diferiram em 2 dB para o isolamento acústico. A dosagem com melhor desempenho proporcionou uma redução de 9 dB em relação ao contrapiso convencional, mostrando ser eficaz para utilização como isolante acústico.

2.4.2 Equipamentos

Acelerômetros, microfones, alto-falantes, excitadores eletrodinâmicos, dentre outros, são transdutores usados para transformar sons ou vibrações em um sinal análogo elétrico ou vice-versa. O sinal elétrico contém todas as informações sobre o fenômeno físico (GERGES, 2000).

Um material piezoelétrico possui a capacidade de produzir uma diferença de potencial elétrico quando submetido a algum tipo de deformação mecânica ou o inverso. Ele é capaz de converter variações de energia mecânica, pressão, vibrações ou força em um sinal elétrico (MISHRA *et al.*, 2015).

O microfone de eletreto é um transdutor que converte variações de pressão do ar em um sinal elétrico diretamente proporcional. Utilizam como material do diafragma um eletreto, material plástico que possui carga elétrica permanente. O diafragma forma uma das placas do capacitor e a outra placa consiste numa lâmina metálica perfurada, para permitir a passagem do ar na movimentação do diafragma. A variação da distância entre as placas, quando da incidência da onda sonora, altera a carga elétrica armazenada no capacitor, gerando um sinal elétrico com a mesma forma de onda da pressão sonora (BISTAFA, 2011).

O alto-falante é um dispositivo transdutor eletroacústico - transforma um sinal elétrico em movimento acústico das partículas de ar em contato com o diafragma do alto-falante. Funciona, portanto, de forma recíproca ao microfone. Assim, a "entrada" do alto-falante é um sinal elétrico e a "saída" é a pressão sonora em determinado ponto do espaço (BISTAFA, 2011).

Um gerador de funções é um aparelho eletrônico utilizado para gerar sinais elétricos de diferentes formas de onda, com frequências e amplitude (tensão) ajustáveis. Já um amplificador de potência, como o próprio nome sugere, amplifica o sinal de baixa magnitude gerado no microfone (BISTAFA, 2011).

A mesa misturadora de som é um equipamento que recebe os sinais de áudio dos sensores piezelétricos e microfones e os acondicionam adequadamente para que possam ser enviados para a placa de som do computador. O direcionamento que o sinal de cada um deles segue, é chamado de canal. Existem canais de entrada e de saída. Os de entrada são os que recebem o sinal das fontes de áudio. Já os de saída levam para outros aparelhos, como amplificadores ou gravadores. Nela é possível controlar o volume de cada fonte de áudio, os níveis de graves e agudos, as frequências médias e para onde o áudio será enviado na saída.

O *software* DSSF3 (*Diagnostic System for Sound Fields Version*) - *Realtime Analyzing System*” pode realizar muitas funções, sendo algumas delas: medidor de nível de pico; gerador de sinal que permite gerar sinais, controlar o canal direito e esquerdo independentemente, alterar a forma da onda, o nível de intensidade do som e a sua frequência; analisador FFT, que permite visualizar a intensidade sonora em função da frequência; espectrograma, que são úteis para analisar o som produzido enquanto se gera algum tipo de ruído; osciloscópio, que permite visualizar e analisar uma onda sonora em função do tempo em um gráfico bidimensional, entre outras.

2.4.3 A borracha aplicada na melhora do desempenho acústico

A modificação do concreto usando um agregado leve e incorporando vazios são opções viáveis para melhorar o desempenho acústico. Isto se deve em grande parte à formação de poros à medida que mais vazios são criados no concreto, o que melhora a

absorção sonora. O concreto com substituição do agregado comum pelo pó de borracha tem sua massa específica significativamente menor (TIE *et al.*, 2020).

Concreto permeável é um concreto com alta porosidade e tem a capacidade de absorver calor e som através de atrito interno. Entretanto, esse tipo de concreto não pode ser utilizado para fins estruturais devido à sua alta porosidade e baixa resistência à compressão. Assim, é aplicado em materiais isolantes para controle térmico e de ruído (LING *et al.* 2010).

Ling *et al.* (2010) constataram que o concreto com 30% de borracha contribui nas melhorias das características de absorção sonora (NRC = 0,12), que é significativamente melhor em comparação com aqueles com 10% (NRC = 0,07) e 20% (NRC = 0,09) de borracha. Isso é atribuído ao aumento da porosidade do concreto. A Figura 20 apresenta a comparação do NRC calculado com base nos coeficientes de absorção sonora para os materiais à base de cimento de várias densidades.

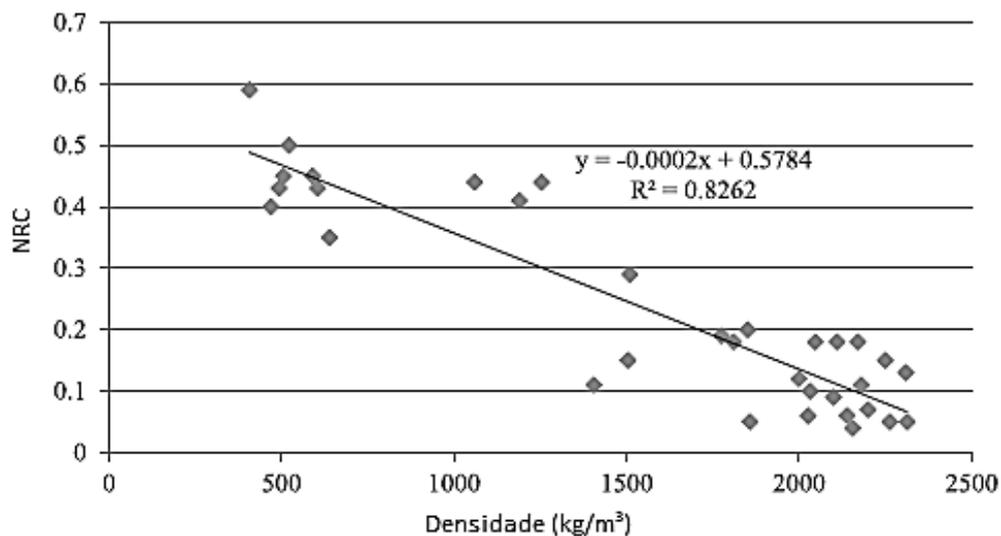


Figura 20 – Relação entre NRC e densidade

Fonte: Adaptado de TIE *et al.*, 2010

O alto teor de substituição de pó de borracha no concreto (até 50%) resulta em maior porosidade no concreto devido ao ar retido entre a pasta de cimento e a superfície do agregado (Figura 21), contribuindo para uma absorção sonora mais alta. Por exemplo, o valor NRC de 0,12 foi relatado no concreto contendo 50% de borracha, enquanto o NRC de 0,07 para o concreto convencional (MOHAMMED *et al.*, 2012).

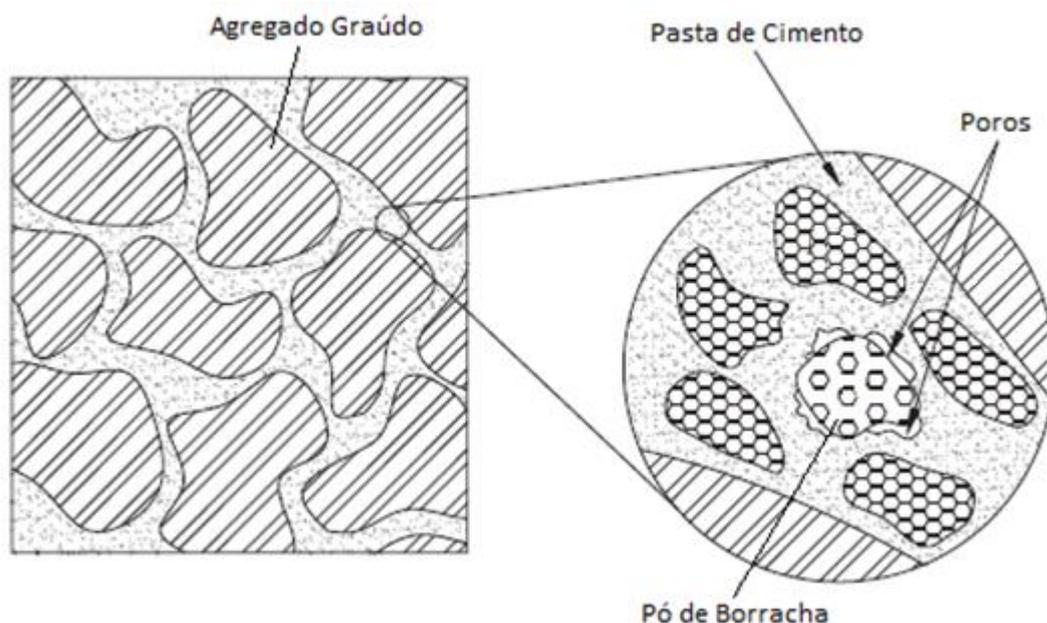


Figura 21 - Ilustração do ar preso no concreto com borracha

Fonte: Adaptado de MOHAMMED *et al.*, 2012

Han *et al.* (2008) estudaram o pó de borracha de pneus visando a redução de ruídos em rodovias. Os principais problemas abordados incluem o método de fabricação das misturas de borracha, as medidas de resistência à tração e a medição do coeficiente de absorção acústica, medido através de uma sala de reverberação.

O concreto é muito rígido e por essa razão as barreiras desse material não absorvem ruídos de forma significativa. Já a borracha é muito macia, sua rigidez é apenas cerca de 1% em comparação ao concreto. A mistura feita com colagem de partículas de borracha com adesivo pode atingir alta porosidade, até 30%. Mas, para o concreto, a porosidade varia de 2% a 7% (HAN *et al.* 2008).

Han *et al.* (2008) mostraram através de medidas de coeficiente de absorção acústica que a borracha triturada pode se apresentar como uma alternativa potencialmente viável ao concreto para o isolamento acústico de rodovias, reduzindo cerca de 16 dB de ruídos.

Corredor-Bedoya *et al.* (2017) estudaram materiais compósitos de argamassa colante e partículas de borracha de pneus com o objetivo principal de caracterizar seu potencial de isolamento ao ruído aéreo. Misturas contendo 10, 15 e 25% (em massa) de partículas de borracha com duas granulometrias diferentes (peneiras entre 18 – 35 e 35 – 60) foram preparadas e as propriedades acústicas foram avaliadas. Tanto a perda de transmissão como o coeficiente de absorção sonora foram medidos usando um tubo de impedância em uma faixa de frequência de 400 Hz a 2500 Hz.

Existe uma influência no tamanho das partículas de borracha e na quantidade de borracha adicionada à mistura na perda de transmissão e na absorção sonora. As misturas com borracha apresentam valores de densidade de massa menores que a argamassa pura. Misturas contendo 15% de partículas de borracha apresentaram maiores valores de perda de transmissão em relação à argamassa pura em todas as faixas de frequência investigadas. Misturas contendo 25% de partículas de borracha apresentaram maiores valores de coeficiente de absorção sonora do que aqueles observados para argamassa pura em uma faixa de frequência de 600 Hz a 2400 Hz (CORREDOR-BEDOYA *et al.*, 2017).

A argamassa pura e a argamassa com borracha incorporada são, em maior ou menor grau, porosos. O fenômeno de absorção sonora de um material pode ser explicado em termos da conversão da energia sonora em calor e considera as interações entre a fase sólida (estrutura porosa) e a fase fluida (o fluido contido no material poroso). Em geral, um bom material de absorção de som possui alto grau de porosidade e coeficientes de absorção sonora próximos a 1 em uma ampla faixa de frequência (CORREDOR-BEDOYA *et al.*, 2017).

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados na pesquisa para confecção do concreto das lajes e argamassas dos corpos de prova, bem como dos contrapisos, estão listados a seguir.

O aglomerante utilizado foi o Cimento *Portland* CP II F 32, da marca MAUÁ, cujos dados estão expostos na Tabela 15. A NBR 16697 (ABNT, 2018) define para o cimento CP II F 32 as seguintes faixas de porcentagens de cada material:

- clínquer + sulfato de cálcio: 75 a 89%;
- material carbonático: 11 a 25%.

Tendo em vista essas variações, foi utilizado sempre o mesmo lote de fabricação, de modo a garantir que não houvesse interferência nos resultados dos ensaios devido a diferentes composições do cimento.

Tabela 15 - Dados do cimento

Parâmetros	CP II F 32	
tempo de início de pega (horas)	≥1	
Perda ao fogo (%)	≤12,5	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	≥10
	7 dias	≥20
	28 dias	≥32

Fonte: MAUÁ, 2019

A areia utilizada foi a areia natural lavada proveniente do Rio Paraíba do Sul, Campos-RJ, passada na peneira #10 (2,0 mm).

Foi utilizado o resíduo de pó de borracha gerado no setor de recauchutagem de pneu (Figura 22), disponibilizado pelo Instituto IDEA CÍCLICA (Instituto para Desenvolvimento Ambiental e Tecnológico), localizado na cidade de Magé - RJ. O Instituto IDEA atua na busca de alternativas que colaborem para que empresas e instituições, ecologicamente conscientes

possam dar um destino ambientalmente seguro a seus resíduos. O pó de borracha foi passado na peneira #20 (0,85 mm).

A água utilizada foi a fornecida pela concessionária da cidade de Campos dos Goytacazes, Águas do Paraíba.



Figura 22 - Pó de borracha

Fonte: Autoria própria

3.2 Escolha da dosagem

Para escolha da dosagem utilizada nas argamassas de contrapiso, foi elaborado um estudo com as dosagens usuais citadas pelos autores Fiorito (2009), Barros (1991) e Cichineli (2009). Foram elaboradas argamassas nas dosagens de 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 e realizados os ensaios de resistência à compressão em 6 corpos de prova de cada. As médias dos resultados estão expostos na Tabela 16.

A relação água/cimento escolhida foi 0,48 (12% da massa) como citado por Barros (1991). Essa quantidade de água proporciona uma argamassa do tipo “farofa” cuja compactação pode ser feita manualmente.

Tabela 16 - Estudo de dosagens

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)
1:3	17,64
1:4	10,22
1:5	9,59
1:6	5,83

Fonte: Autoria própria

Além disso, a dosagem das argamassas comuns na execução de contrapisos da cidade de Campos dos Goytacazes é de 1:3 em massa de cimento e areia.

Portanto, analisando os dados da Tabela 16 e pelo uso já difundido na construção civil, foi escolhida a dosagem 1:3 em massa de cimento e areia, uma vez que as demais dosagens, principalmente a 1:6, diminuem muito a resistência à compressão da argamassa, propriedade fundamental para contrapisos.

3.3 Denominação das argamassas

Foram elaboradas 4 argamassas de diferentes proporções: 1 argamassa de referência com 100% de areia e 3 argamassas com substituição em massa de 10, 20 e 30% de areia por pó de borracha. A substituição em massa foi escolhida em função da exatidão que um estudo experimental exige.

A denominação das argamassas está apresentada na Tabela 17. Essas porcentagens foram as escolhidas para que pudessem ser avaliadas tanto a melhora no desempenho acústico quanto a diminuição da resistência mecânica da argamassa.

Tabela 17 - Denominação das argamassas pesquisadas

Argamassa	Nome
Argamassa de referência (100% de agregado miúdo)	A0
Argamassa com 10% de substituição de areia por pó de borracha	A10
Argamassa com 20% de substituição de areia por pó de borracha	A20
Argamassa com 30% de substituição de areia por pó de borracha	A30

Fonte: Autoria própria

3.4 Caracterização da areia

Para a identificação dos componentes químicos da areia, foi realizada uma análise química qualitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X (EDX). O equipamento utilizado é da marca SHIMADZU, modelo EDX-7000, do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV/UENF. Para tal ensaio a areia passou por processo de cominuição mecânica em almofariz e pistilo (número 4), ambos de porcelana.

A composição mineralógica qualitativa da areia foi obtida por meio de difração de raios X (DRX), em amostras na forma de pó utilizando equipamento SHIMADZU, modelo DXR 7000,

operando com radiação Cu-K α e 2 θ variando de 5° a 60°. Pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Para identificação das fases mineralógicas foi utilizado o *software Match!3* da *Crystal Impact*. Um banco de dados de referência gratuito chamado "COD" é instalado por padrão automaticamente junto com o *Match!*. Este banco de dados de referência contém padrões de difração calculados a partir de dados da estrutura cristalina obtidos no *Crystallography Open Database* (COD), que fornece dados da estrutura cristalina publicados pelos periódicos da IUCr, American Mineralogist Crystal Structure Database (AMCSD) e várias outras fontes. Para tal ensaio a areia sofreu processo de cominuição mecânica em almofariz e pistilo (número 4) de porcelana.

3.5 Caracterização do pó de borracha

Para a identificação dos componentes químicos do pó de borracha, foi realizada uma análise química qualitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX). O equipamento utilizado é da marca SHIMADZU, modelo EDX-7000, do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV/UENF.

Também foi determinada a perda ao fogo da matéria-prima. O ensaio foi realizado com amostras previamente secas em estufa à 110°C por 8 horas e submetidas a queima em forno mufla à temperatura de 950 °C, taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de residência de 15 minutos. O resultado foi obtido de acordo com a expressão:

$$PF = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Com:

PF = Perda ao fogo (%);

M_s = Massa da amostra seca a 110 °C em estufa (g);

M_c = Massa da amostra calcinada a 950 °C por 15 minutos (g).

3.6 Granulometria

A análise granulométrica foi obtida conforme recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003), que prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos através do peneiramento do material.

Foram utilizados 300 g de cada proporção de agregados neste ensaio conforme recomendação da norma para agregados com dimensão máxima de 4,75 mm. As amostras foram lavadas na peneira #200 a fim de retirar materiais pulverulentos incorporados aos agregados e em seguida secas em estufa até massa constante.

As peneiras foram encaixadas conforme a Figura 23 com as aberturas das malhas contidas na Tabela 18, de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. Vale ressaltar que foram usadas peneiras além das recomendadas pela norma para a série normal de modo que a curva granulométrica fosse mais precisa.



Figura 23 - Peneiras para ensaio de granulometria

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica

Peneira	Abertura (mm)
10	2,000
16	1,180
18	1,000
20	0,850
30	0,600
35	0,500
45	0,355
50	0,300
60	0,250
80	0,180
100	0,150
120	0,125
170	0,090
200	0,075
Fundo	-

Fonte: Autoria própria

Os agregados com dimensão maior que 2 mm foram descartados, uma vez que não possuem quantidade significativa. Em seguida as amostras foram colocadas no jogo de peneiras e promovida agitação de forma manual do conjunto até que a massa fosse constante. Por fim, foram determinadas as massas do material retido em cada peneira.

A dimensão máxima característica do agregado é a grandeza associada à distribuição granulométrica, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O módulo de finura foi calculado através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

3.7 Massa unitária

As massas unitárias dos agregados foram obtidas conforme recomendações da NBR NM 45 (ABNT, 2006), que prescreve o método para a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, em estado compactado ou solto.

Uma amostra de cada proporção de agregado foi coletada e seca em estufa até massa constante a 105 ± 5 °C. O recipiente utilizado neste ensaio foi o exposto na Figura 24, cuja massa (M_r) é 893,84 g e cujo volume (V) é 400 cm³.



Figura 24 - Recipiente cilíndrico utilizado nos ensaios cujo volume é conhecido (400 cm³)

Fonte: Autoria própria

Em seguida, encheu-se o recipiente com o material até um terço de sua capacidade e efetuado o adensamento da camada com 25 golpes da haste de adensamento (Figura 30), distribuídos uniformemente em toda a superfície do material. Repetiu-se esse procedimento

até o enchimento do recipiente. Por fim, foi nivelada a camada superficial com uma espátula. Foi determinada a massa do recipiente mais seu conteúdo (M_{ar}), conforme exposto na Figura 25.



Figura 25 - Ensaio de massa unitária

Fonte: Autoria própria

A massa unitária do agregado é a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações, calculados através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{M_t - M_r}{V} \quad \text{Equação 9}$$

Com:

ρ = massa unitária (kg/m³);

M_t = massa do recipiente mais seu conteúdo (kg);

M_r = massa do recipiente (kg);

V = volume do recipiente (m³).

3.8 Ensaios das argamassas no estado fresco

As argamassas foram produzidas seguindo as orientações da NBR 16541 (ABNT, 2016), norma que especifica um método de preparo da mistura de argamassa, em laboratório, a ser utilizada na realização de ensaios necessários à caracterização do material.

O procedimento da mistura consistiu, primeiramente, em colocar todos os materiais anidros na argamassadeira, acionar o misturador na velocidade baixa e adicionar 75% da água à argamassa nos 10 s iniciais, misturando-se até completar 30 s. Em seguida, mudou-se para velocidade alta e misturou-se por mais 60 s. Foi retirada a pá e raspada toda a superfície interna do misturador, deixando o conteúdo repousar por 90 s. Novamente foi

acionado o misturador em velocidade baixa e adicionado o restante da água em 10 s, continuando a misturar até completar 60 s. Ao final do tempo de maturação de 15 min, coberta por pano úmido, a argamassa foi misturada por mais 15 s em velocidade baixa. Após o devido preparo das argamassas, elas foram submetidas aos ensaios citados a seguir.

3.8.1 Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa no estado fresco foi realizado seguindo as recomendações da NBR 13278 (ABNT, 2005).

Primeiramente foi feita a calibração do recipiente cilíndrico de ensaio (Figura 24), registrando a massa do mesmo vazio (M_v) e seu volume cheio de água destilada (V_r). Este volume foi definido pela subtração da massa do recipiente com água pela massa do recipiente vazio. Feito isso, a argamassa fresca foi introduzida no recipiente calibrado em três camadas de alturas uniformes, aplicando 20 golpes em cada camada. A fim de não restarem vazios entre a argamassa e a parede do recipiente, foram efetuados cinco golpes distribuídos ao redor da parede externa. Por fim, o recipiente foi rasado, regularizando a superfície e eliminando excessos, e então aferida a massa (M_c).

Com os valores obtidos de massa e volume, calculou-se a densidade de massa no estado fresco (d), em kg/m^3 , conforme a equação:

$$d = \frac{M_c - M_r}{V_r} \times 1000 \quad \text{Equação 10}$$

Com:

d = densidade de massa no estado fresco (kg/m^3);

M_c = massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (g);

M_r = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

V_r = volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

O teor de ar incorporado foi calculado seguindo as recomendações da NBR 13278 (ABNT, 2005), mesma norma da densidade de massa, fazendo 6 repetições para cada dosagem, através da seguinte equação:

$$A_i = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Com:

A_i = teor de ar incorporado (%);

d = densidade de massa da argamassa (kg/m^3);

d_t = densidade de massa teórica da argamassa (g/cm^3), obtido através de:

$$d_t = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\gamma_i}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

M_i = massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa de água (g);

γ_i = massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3).

3.8.2 Retenção de água

O ensaio de retenção de água foi executado conforme recomendações da NBR 13277 (ABNT, 2005), utilizando uma bomba de vácuo para aplicar sucção na argamassa e um funil de *Buchner*, conforme a Figura 26, fazendo-se 4 determinações para cada argamassa.



Figura 26 - Aparelho utilizado no ensaio de retenção de água

Fonte: Autoria própria

O procedimento iniciou-se com a colocação do prato sobre o funil, de modo a garantir estanqueidade entre eles, e, em seguida, posicionou-se o papel-filtro umedecido no fundo do prato. A bomba de vácuo foi acionada com a torneira ainda fechada até que a sucção atingisse 51 mm de mercúrio. Neste momento, a torneira foi aberta para retirada do excesso de água do papel-filtro por 90 segundos. Em seguida, pesou-se o conjunto funil/papel-filtro (M_v). O prato foi preenchido com argamassa até acima da borda, sendo feito o adensamento com soquete, sendo 16 golpes distribuídos junto a borda e 21 golpes na parte central da amostra. Foi feita a retirada do excesso de argamassa com auxílio de uma régua metálica. Após a limpeza do excesso, realizou-se a pesagem do conjunto com argamassa (M_a). Posteriormente, a torneira foi novamente aberta, sendo aplicada uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos. Por fim, o conjunto foi pesado (M_s). Com esses valores, calculou-se a retenção de água (R_a) pela equação:

$$R_a = \left[1 - \frac{(M_a - M_s)}{AF \times (M_a - M_v)} \right] 100 \quad \text{Equação 13}$$

Com:

R_a = retenção de água (%);

M_a = massa do conjunto com argamassa (g);

M_s = massa do conjunto após a sucção (g);

M_v = massa do conjunto vazio (g);

AF = fator de água/argamassa, obtido através da equação:

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad \text{Equação 14}$$

Com:

M_w = massa total de água acrescentada à mistura (g);

M = soma das massas dos componentes anidros (g).

3.8.3 *Squeeze flow*

O ensaio *squeeze flow*, seguindo o que está prescrito na NBR 15839 (ABNT, 2010), consistiu na compressão de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas

paralelas, conforme está exposto na Figura 27. Este ensaio permite o estudo do comportamento reológico através da deformação da argamassa fluida enquanto esta é comprimida.



Figura 27 - Ensaio *squeeze flow*

Fonte: Autoria própria

Primeiramente foi despejada a argamassa em estado fresco num molde cilíndrico de 100 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura (Figura 28), visando preencher todo o volume em quantidade suficiente para exceder a altura. Em seguida, foi realizada a acomodação da argamassa executando movimentos verticais com a espátula na posição horizontal e sua lâmina perpendicular ao plano superior do molde. Foram realizados 20 golpes com soquete padrão paralelos e uniformemente distribuídos no diâmetro do corpo de prova. O molde foi rasado com régua metálica em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos de vai e vem. Por fim o molde foi retirado com cuidado para não ocorrer descentralização nem deformação do corpo de prova.



Figura 28 - Molde cilíndrico para ensaio *squeeze flow*

Fonte: Autoria própria

O corpo de prova foi posicionado na máquina de ensaio de compressão e a placa superior foi posicionada até que encostasse suavemente no mesmo. Iniciado o ensaio, que foi realizado em duas velocidades de deslocamento: 0,1 mm/s (lento) e 3 mm/s (rápido), este somente terminou quando o deslocamento da placa superior atingiu 9 mm ou quando a carga máxima foi de 1 kN. Os resultados foram expressos através de gráfico de carga (N) versus deslocamento (mm).

O perfil típico obtido neste ensaio apresenta 3 regiões bem definidas, conforme demonstrado na Figura 29.

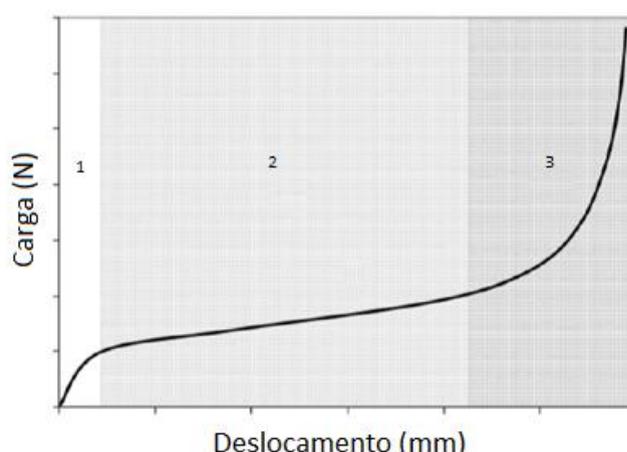


Figura 29 - Perfil típico de carga x deslocamento em um ensaio *squeeze flow* para argamassas

Fonte: Autoria própria

No estágio 1, em pequenas deformações, a argamassa comporta-se como um sólido apresentando deformação linear; na segunda região (II), correspondente a deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial elongacional e o cisalhamento supera as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, como consequência o material flui com deformação plástica e/ou viscosa; por fim o terceiro estágio (III), em grandes deformações, ocorre aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material, o que caracteriza que o fluxo do material é restrito porque as forças de atrito entre o material são predominantes nesse estágio (AZEVEDO *et al*, 2017).

As argamassas com região 2 expressiva, apresentam comportamento mais trabalhável, uma vez que nessa região o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo de força, o que favorece a produtividade na aplicação de argamassas, enquanto argamassas com região 3 predominante apresentam dificuldades na trabalhabilidade, uma vez que nesse estágio o comportamento dos procedimentos de

aplicação e acabamento tendem a ser dificultados devido às altas cargas envolvidas, podendo ocorrer separação das fases do material (AZEVEDO *et al.*, 2017).

3.9 Ensaios das argamassas no estado endurecido

Por ser uma argamassa com baixo teor de água, como indicado para uso em contrapisos, para a confecção dos corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, foi elaborado um padrão de compactação. A argamassa fresca foi introduzida no molde em três camadas de alturas uniformes, aplicando 30 golpes em cada camada com soquete metálico (Figura 30) de 352 g a uma altura de 4 cm, o que fornece uma energia de 13,81 Joules para uma área de 64 cm² (4 x 16 cm) o que resulta em 0,22 J/cm², mesmo trabalho utilizado pelo soquete de madeira para compactação dos contrapisos.

Por fim, a superfície do molde foi rasada com uma régua metálica, de modo a retirar o excesso de argamassa e deixar plana as faces dos corpos de prova.



Figura 30 - Soquete metálico

Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova permaneceram nos moldes por 48 horas e foram, posteriormente, desmoldados e mantidos em condições laboratoriais de temperatura do ar de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 %, segundo consta na NBR 13279 (ABNT, 2005). Nesses corpos de provas, foram realizados os ensaios para determinar suas propriedades no estado endurecido.

3.9.1 Resistência à tração na flexão

Para realização deste ensaio foram confeccionados seis corpos de prova para cada tipo de dosagem e curados por 28 dias.

Seguindo o disposto na NBR 13279 (ABNT, 2005), as amostras foram colocadas sobre os apoios do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os apoios ou com o aplicador de carga, conforme a Figura 31. A ruptura dos corpos de prova foi feita a partir da aplicação de uma carga pontual no centro do prisma de 50 ± 10 N/s, em

prensa EMIC modelo DL2000, sendo o cálculo da resistência à tração na flexão (R_t), em MPa, obtido através da equação:

$$R_t = \frac{1,5 \times F_t \times L}{40^3} \quad \text{Equação 15}$$

Com:

R_t = Resistência à tração na flexão (MPa);

F_t = Carga máxima aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = Distância entre os suportes (mm).



Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão

Fonte: Autoria própria

3.9.2 Resistência à compressão axial

Este ensaio também foi executado conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo ensaiadas seis metades dos prismas rompidos à tração na flexão.



Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão

Fonte: Autoria própria

Seguiu-se o mesmo procedimento do ensaio anterior, com aplicação da carga de 500 ± 50 N/s até a ruptura da amostra. Dessa forma, a resistência à compressão (R_c) foi determinada através da seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Equação 16}$$

Com:

R_c = Resistência à compressão (MPa);

F_c = Carga máxima aplicada (N).

3.9.3 Resistência de aderência à tração

Os ensaios de resistência de aderência à tração foram executados de acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010) com algumas adaptações.

O ensaio foi realizado no contrapiso sobre a laje, com distribuição de no mínimo 12 corpos-de-prova em cada argamassa. A distribuição foi feita de modo que os corpos de prova ficassem espaçados entre si, além dos cantos e das quinas, em no mínimo 50 mm (Figura 33). Para a obtenção desses corpos de prova, primeiramente foram realizados cortes com

uma serra copo de 50 mm de diâmetro, a uma profundidade de 1 a 5 mm no substrato (laje de concreto), como é mostrado na Figura 34.

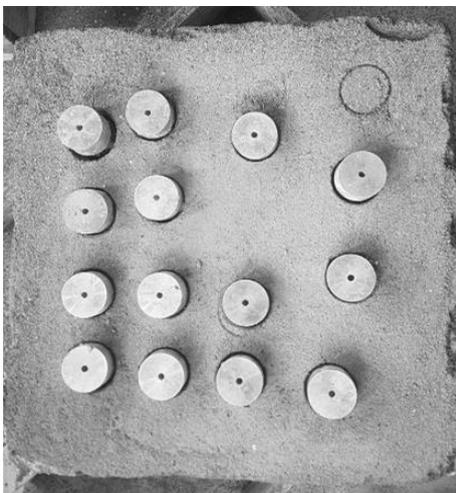


Figura 33 - Corpos de prova para ensaio de resistência de aderência à tração

Fonte: Autoria própria



Figura 34 - Cortes nas argamassas sendo realizados com serra copo

Fonte: Autoria própria

Após o corte, realizou-se a colagem das pastilhas metálicas, de 50 mm de diâmetro, utilizando cola Epóxi, evitando-se que a espessura da cola ultrapassasse 5 mm. Após a secagem da cola, iniciou-se o ensaio com a aplicação de uma carga contínua com auxílio de um dinamômetro calibrado (Figura 35) sobre as pastilhas, conforme exposto na Figura 36.



Figura 35 - Dinamômetro utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração

Fonte: Autoria própria



Figura 36 - Ensaio de resistência de aderência à tração sendo executado

Fonte: Autoria própria

Os resultados e a superfície onde ocorre a ruptura foram registrados, sendo a tensão de ruptura (MPa) dada pela carga de ruptura (N) e área da pastilha (mm²). A NBR 13528 (ABNT, 2010) estabelece os tipos de ruptura existentes neste ensaio, conforme exposto na Figura 37.

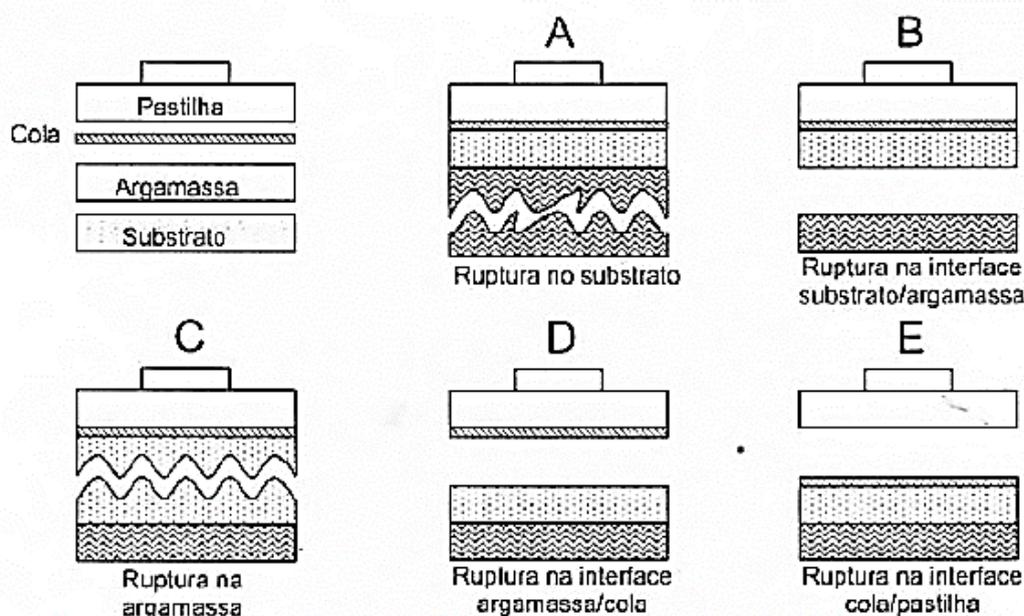


Figura 37 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração

Fonte: ABNT NBR 13528, 2010

3.9.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção de água foi executado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), sendo utilizado três corpos de prova para cada diferente dosagem, após a cura de 28 dias.

A princípio, as amostras foram levadas a estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 72 h, ou até obter massa constante, e determinada a sua massa (M_s). Depois os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por 72 h, ou até obter massa constante. Depois da etapa de saturação em água, os corpos de prova foram levados à ebulição, conforme a Figura 38 - A, sendo mantidos no processo de fervura por 5 h, com o volume de água constante no recipiente. Esperou-se a água resfriar naturalmente até atingir a temperatura ambiente, registrando-se a massa imersa (M_i), conforme a Figura 38 - B. Por fim, os corpos de prova foram retirados da água, passado um pano úmido a fim de retirar o excesso de água superficial, e registrada a massa saturada (M_{sat}).



Figura 38 - Ensaio de absorção de água. A) Corpos de prova em ebulição. B) Registro da massa imersa

Fonte: Autoria própria

Determinados os valores anteriores, calculou-se a absorção de água e o índice de vazios através das seguintes equações:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 17}$$

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

Com:

A = absorção de água por imersão (%);

M_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

M_s = massa da amostra seca em estufa (g);

I_v = índice de vazios (%);

M_i = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), a massa específica seca (ρ_s) é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; a massa específica saturada (ρ_{sat}) é a relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; e a massa específica real (ρ_r) é a relação entre a massa do material seco e o seu volume,

excluindo os poros permeáveis. Esses valores foram calculados através das seguintes equações:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 19}$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 20}$$

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{Equação 21}$$

Com:

ρ_s = massa específica da amostra seca;

ρ_{sat} = massa específica da amostra saturada;

ρ_r = massa específica real;

M_s = massa da amostra seca em estufa (g);

M_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

M_i = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

3.9.5 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa aparente no estado endurecido foi determinada de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005), sendo utilizados 6 corpos de prova de cada dosagem.



Figura 39 - Medição dos corpos de prova

Fonte: Autoria própria

Após 28 dias de cura, os prismas tiveram seus valores de altura (h), largura (l) e comprimento (c) medidos com um paquímetro (Figura 39), em cm, e determinada suas respectivas massas (M_{cp}), em g. Foi determinado a densidade de massa aparente no estado endurecido (D), em kg/m^3 , conforme a seguinte equação:

$$D = \frac{M_{cp}}{l \times h \times c} \times 1000 \quad \text{Equação 22}$$

Com:

D = densidade no estado endurecido (kg/m^3);

M_{cp} = massa do corpo de prova (g);

l = largura do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm);

c = comprimento do corpo de prova (cm).

3.9.6 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio seguiu as recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2005), sendo analisado seis corpos de prova de cada dosagem curados por 28 dias (Figura 40).



Figura 40 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Fonte: Autoria própria

Após a cura, as amostras tiveram suas superfícies lixadas com lixa grossa e limpas com pincel para retirar o excesso de pó, sendo determinada, em seguida, sua massa inicial (M_0). Posteriormente, os corpos de prova foram posicionados, de forma que a face da base quadrada ficasse sobre os suportes no recipiente de ensaio, evitando a molhagem das outras faces. O nível de água permaneceu constante a 5 ± 1 mm acima da superfície em contato com a água. Feito isso, foi determinada a massa das amostras em contato com água aos 10 minutos (M_{10}) e aos 90 minutos (M_{90}).

Através das equações seguintes foram calculadas, respectivamente, a absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (A_{10}), a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (A_{90}) e o coeficiente de capilaridade:

$$A_{10} = \frac{M_{10} - M_0}{16} \quad \text{Equação 23}$$

$$A_{90} = \frac{M_{90} - M_0}{16} \quad \text{Equação 24}$$

$$C = M_{90} - M_{10} \times 10 \quad \text{Equação 25}$$

Com:

A_{10} = Absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (g/cm^2);

A_{90} = Absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm^2);

M_{10} = Massa do corpo de prova aos 10 minutos (g);

M_0 = Massa inicial do corpo de prova (g);

M_{90} = Massa do corpo de prova aos 90 minutos (g).

C = Coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

3.9.7 Microscopia eletrônica de varredura

Após 90 dias de cura dos corpos de prova, foram coletadas amostras de cada uma das dosagens, conforme exposto na Figura 41. Essas amostras foram retiradas dos corpos de prova íntegros com uma serra mármore e possuem dimensão de 4 x 4 cm e 1 cm de altura. Elas foram cobertas por deposição de íons metálicos de ouro num equipamento metalizador SHIMADZU IC-50, conforme a Figura 42. Os aspectos morfológicos das argamassas foram

avaliados através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), em microscópio SHIMADZU SSX-550, do LAMAV/UENF.



Figura 41 - Amostras para microscopia eletrônica de varredura

Fonte: Autoria própria



Figura 42 - Equipamento utilizado para recobrimento por deposição metálica sobre as amostras

Fonte: Autoria própria

3.9.8 Difração de raios X

Após 90 dias de cura dos corpos de prova, foram coletadas amostras de cada uma das dosagens. Essas amostras passaram por processo de cominuição mecânica em almofariz e pistilo (número 4), ambos de porcelana e passadas integralmente na peneira #200 (0,075 mm). Foi realizado o ensaio de difração de raios X (DRX) como forma de reconhecimento da composição mineralógica dessas amostras das argamassas (Figura 43), utilizando equipamento SHIMADZU DXR 7000, operando com radiação Cu-K α e 2θ variando de 5° a 60°, pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).



Figura 43 - Amostras das argamassas para ensaio de DRX

Fonte: Autoria própria

3.10 Execução das lajes

Foram elaboradas 4 lajes com dimensões de 50x50x8 cm, em concreto armado, com o propósito de servirem como base para execução dos contrapisos.

O detalhamento exposto na Figura 44 mostra a armadura utilizada nas lajes. Foram utilizadas 4 barras de aço de 6,3 mm, espaçadas a cada 14,5 cm, com cobrimento de 2 cm, conforme recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para lajes maciças.

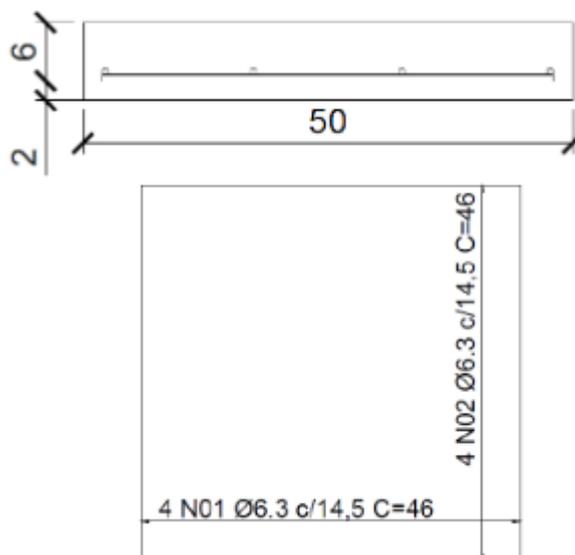


Figura 44 - Detalhamento da armadura positiva das lajes

Fonte: Autoria própria

A mesma dosagem foi utilizada no concreto de todas as lajes, baseada em Garcia (2002), sendo 1:2,25:3,25 (cimento, areia e brita) em massa e relação água/cimento 0,7. O cimento utilizado foi o CP II F 32, a areia natural lavada do Rio Paraíba do Sul e a brita 0.

Primeiramente, foram montadas 4 formas de madeira com 12 cm de altura, passado o desmoldante para facilitar a desforma, e em seguida distribuída a malha de aço com o espaçador do tipo “cadeirinha” de 2 cm de altura. Por fim, foi distribuído de forma uniforme o concreto, executado em betoneira, e vibrado para retirada de ar. O passo-a-passo está exposto na Figura 45.

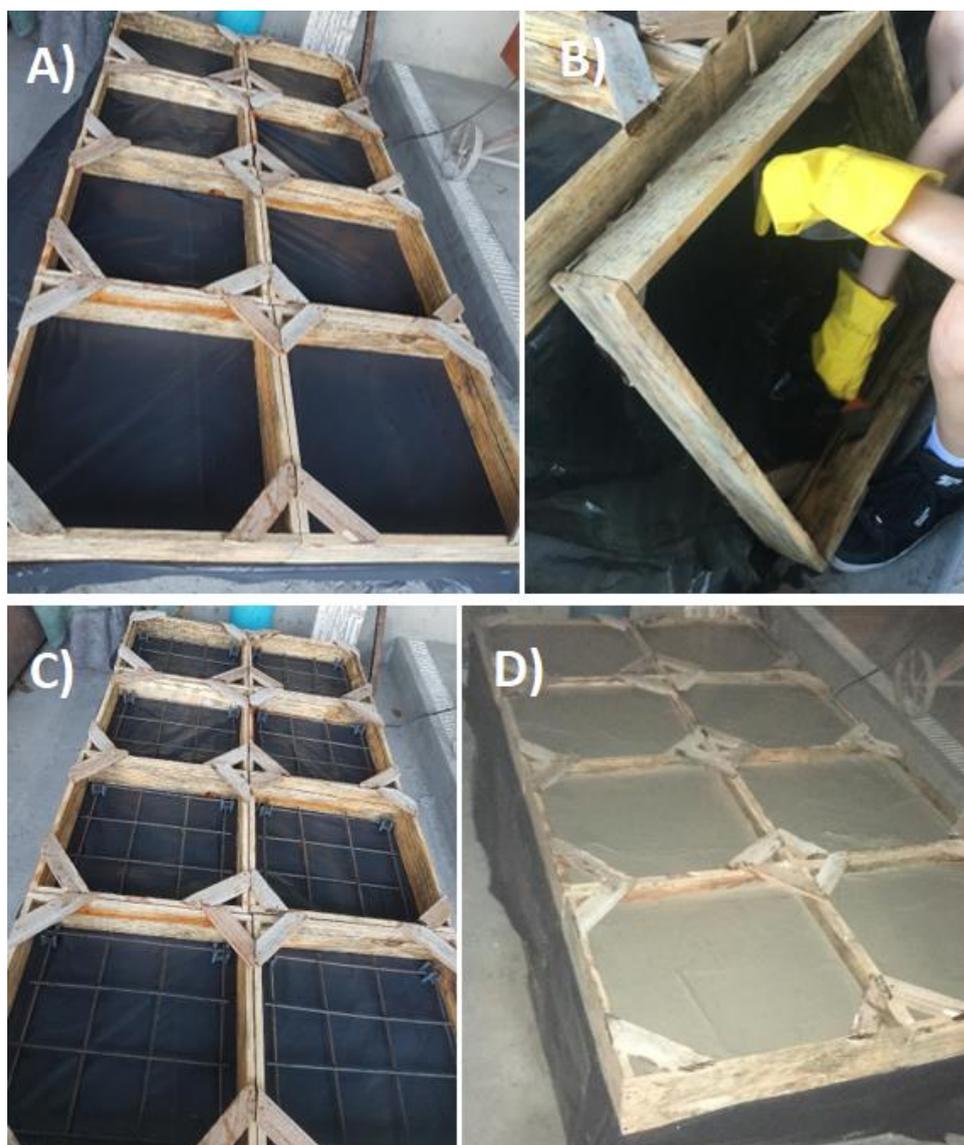


Figura 45 - Passo-a-passo da confecção das lajes: A) Execução das formas; B) Aplicação de desmoldante; C) Armação montada e posicionada; D) Lajes concretadas

Fonte: Autoria própria

3.11 Execução dos contrapisos

Foram confeccionados contrapisos de 50 x 50 cm para cada dosagem estudada, com espessuras de 4 cm sobre as lajes citadas anteriormente, conforme a Figura 46.

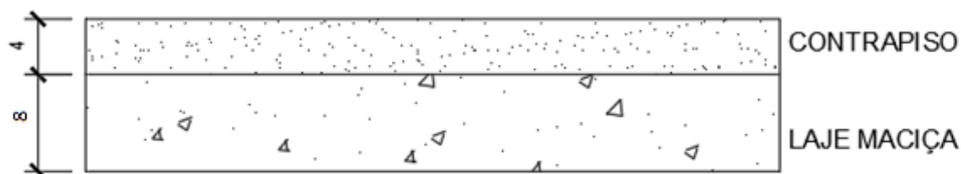


Figura 46 - Vista frontal das lajes e contrapisos

Fonte: Autoria própria

Dado o tempo de cura de 28 dias das lajes, ela foi preparada para o recebimento do contrapiso. Essa preparação consistiu em polvilhar 100 g de cimento sobre a laje e, com ajuda de uma vassoura, escovar a massa. Em seguida distribuiu-se de forma uniforme a argamassa de contrapiso com dosagem de 1:3 (cimento e areia) com relação água/cimento igual a 0,48, que consiste numa argamassa usual em obras, com consistência do tipo farofa, de fácil compactação manual. Essa argamassa foi compactada com ajuda de um soquete de madeira maciça e peso 3715,6 g solto a uma altura de 15 cm e, por fim, sarrafeada com movimento de vai e vem apoiando-se a régua de madeira na forma. O passo-a-passo está exposto na Figura 47.



Figura 47 - Passo-a-passo da execução do contrapiso: A) Polvilho de cimento; B) Compactação do contrapiso com soquete de madeira; C) Sarrafeamento; D) Contrapiso pronto

Fonte: Autoria própria

O trabalho realizado com o soquete de madeira solto a uma altura de 15 cm é de 546,75 Joules para uma área de 2500,0 cm² (50 x 50 cm), o que resulta em 0,22 J/cm², mesmo trabalho utilizado pelo soquete metálico para compactação dos corpos de prova.

Na Figura 48, observa-se que os contrapisos com adição de pó de borracha, principalmente as amostras A20 E A30, possuem em suas extremidades pontos de fragilidade que, com o tempo, desgastam os contrapisos. Esse fato ocorre tanto pela dificuldade de compactação das bordas, quanto pela diminuição da resistência que essa adição proporciona à argamassa.

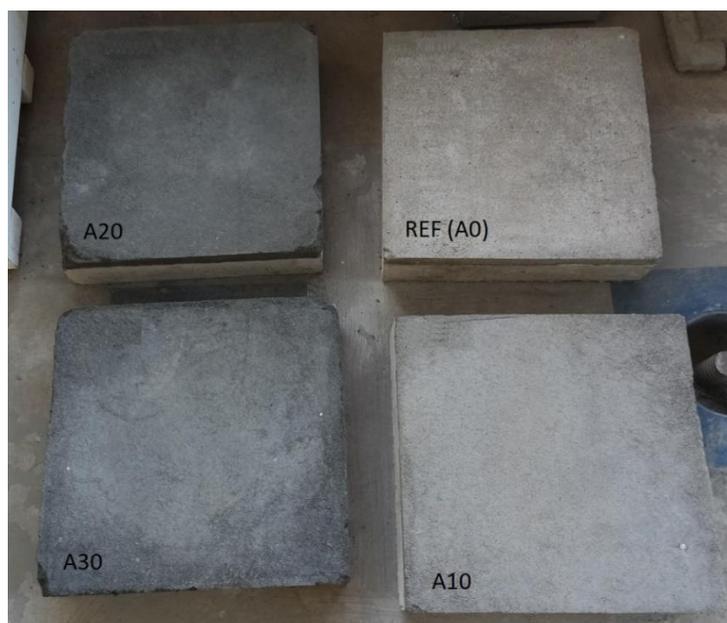


Figura 48 - Amostras de contrapisos concluídas

Fonte: Autoria própria

3.12 Desenvolvimento da câmara acústica

Foi desenvolvida uma câmara acústica, nomeada *Arenato*, para realização do ensaio acústico nos contrapisos. Ela consiste em dois compartimentos internos, separados pelo contrapiso sobre a laje. A parte externa é mostrada na Figura 49 e a parte interna nas Figura 50 (projeto) e Figura 51 (execução).

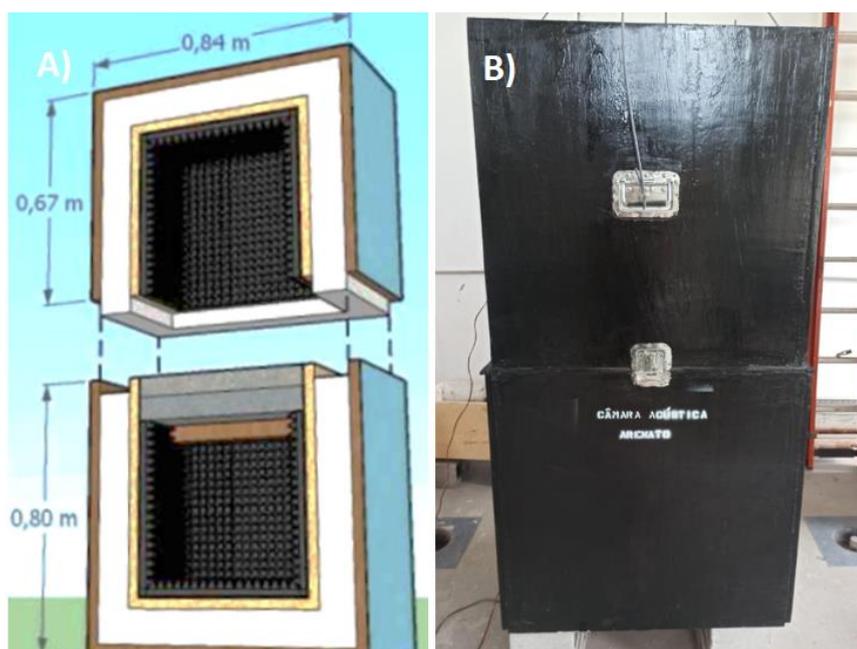


Figura 49 - Câmara acústica Arenato. A) Projeto; B) Execução

Fonte: Autoria própria

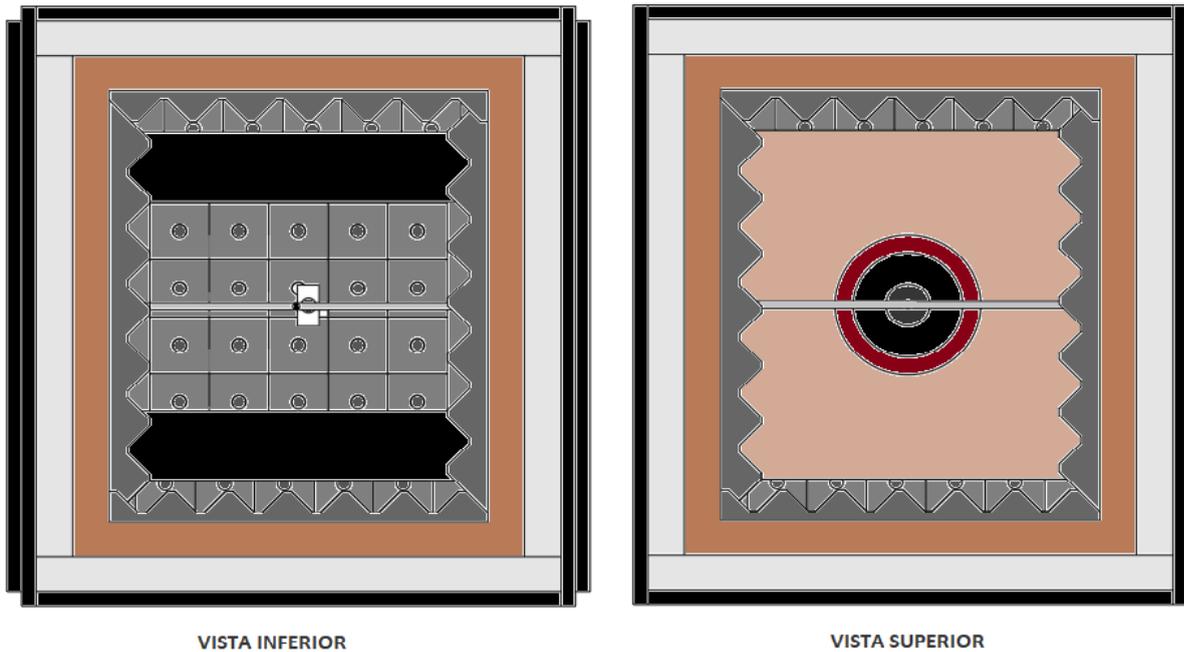


Figura 50 – Vista interna das partes superior e inferior da câmara acústica (projeto)

Fonte: Autoria própria

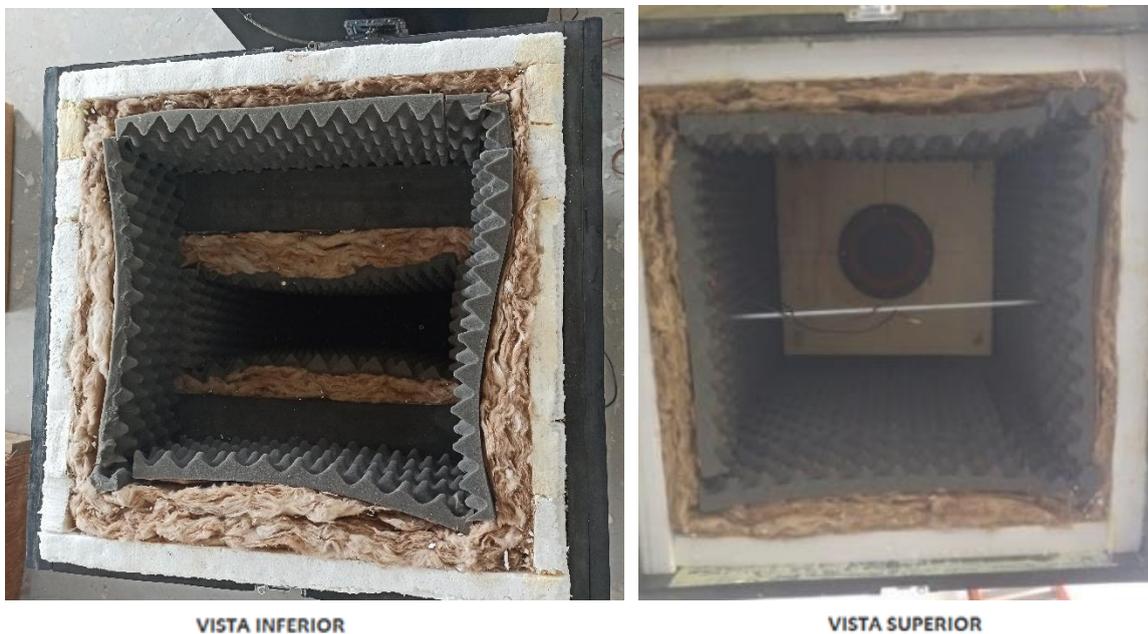


Figura 51 – Vista interna das partes superior e inferior da câmara acústica (execução)

Fonte: Autoria própria

Os materiais escolhidos para a elaboração da câmara estão identificados na Tabela 19 e na Figura 52. Na parte interna da câmara, esses materiais foram escolhidos em função do alto coeficiente de absorção sonora e o material na parte externa foi escolhido por ser um

material refletor, de modo a garantir que o ruído externo não interfira nos resultados das medições. Esses materiais foram colados com cola branca especialmente desenvolvida para colagem em madeira.

Tabela 19 - Materiais escolhidos para a câmara acústica e suas especificações

Material	Espessura	Densidade
Madeira Compensada	2 cm	650 kg/m ³
Poliestireno expandido	5 cm	11 kg/m ³
Lã de vidro	10 cm	10 kg/m ³
Espuma de poliuretano	3,5 cm	26 kg/m ³

Fonte: Autoria própria



Figura 52 - Vista superior da câmara acústica e seus materiais constituintes

Fonte: Autoria própria

Para apoiar a laje (amostra), há duas vigas madeira de 10 x 5 cm parafusadas na parte externa. Essas vigas foram cobertas com material emborrachado de modo a não transferir vibração nas medições acústicas (Figura 52).

A parte superior da câmara é içada através de dois cabos de aço presos a quatro alças nas superfícies da câmara e com o auxílio da ponte rolante (Figura 53). Ainda há dois fechos

do tipo borboleta, que ao serem travados, pressionam a borda do compartimento superior contra a inferior, permitindo uma melhor vedação da câmara.

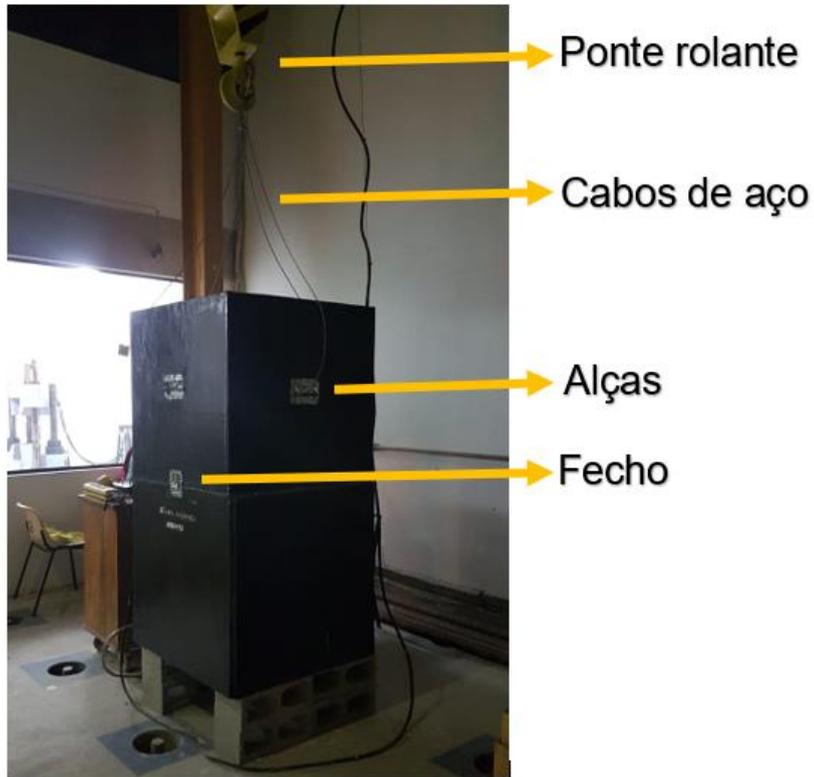


Figura 53 - Cabos de aço suspendendo a parte superior da câmara acústica

Fonte: Autoria própria

As vistas e corte da câmara acústica estão expostas nas Figura 54 e Figura 55, respectivamente.

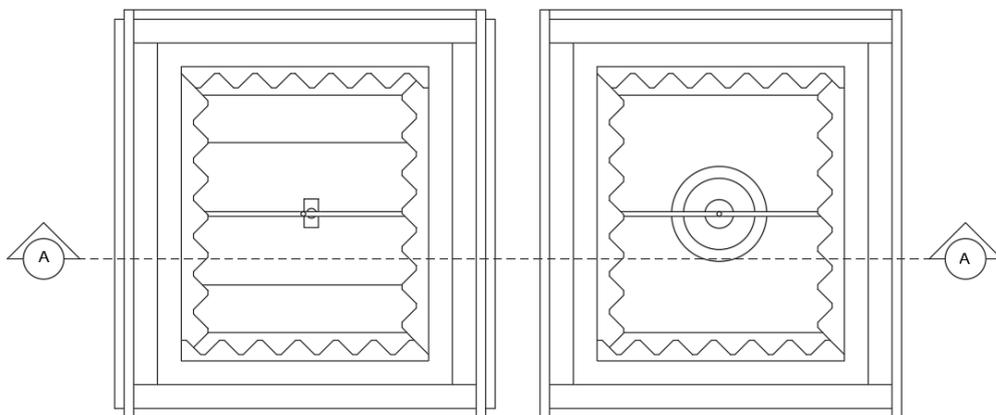


Figura 54 - Vistas internas da câmara acústica

Fonte: Autoria própria

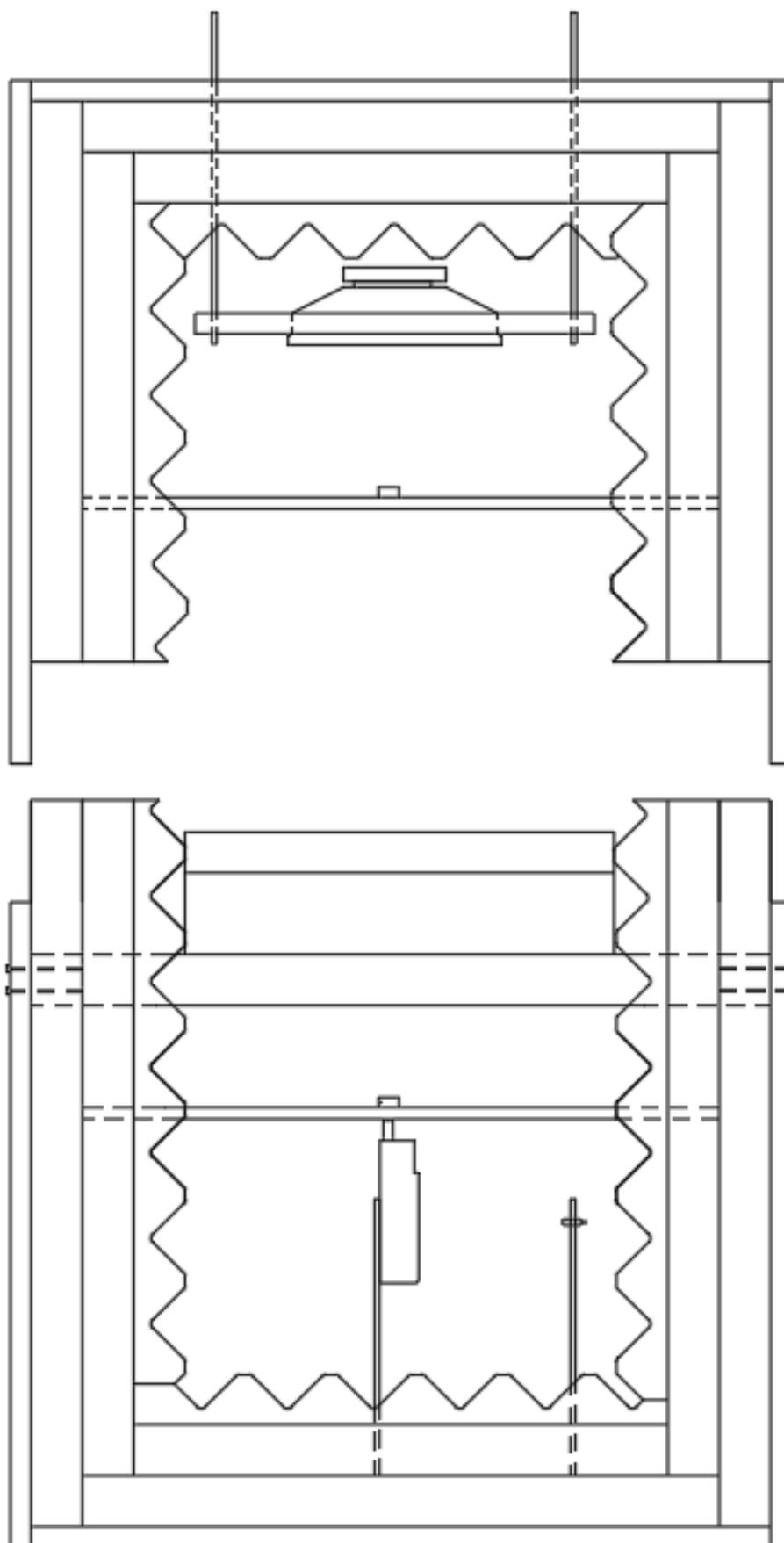


Figura 55 - Corta AA da câmara acústica

Fonte: Autoria própria

3.13 Ensaio acústico

No compartimento superior ficam: o equipamento emissor de ruído aéreo, sendo este um alto falante, o dispositivo gerador de ruído de impacto, elaborado no LCFIS/UENF, um microfone de eletreto e um sensor piezelétrico aderido sobre o contrapiso. Já no compartimento inferior: um microfone de eletreto, um sensor piezelétrico aderido sob a laje, um decibelímetro e uma câmera (Figura 57). Há também um *notebook* que gera o sinal de ruído branco que é enviado para o alto falante via amplificador de potência. Os microfones e os sensores de vibração são conectados a uma mesa misturadora de áudio, e através da saída desta, os sinais são enviados para a placa de áudio do computador. Além disso, os microfones de eletreto necessitam ser alimentados por uma bateria 9 V externa. O gerador de função é ajustado para gerar um sinal senoidal de 7 Hz que é direcionado ao amplificador, e assim, excitar o dispositivo gerador de ruído de impacto. O esquema dos equipamentos está na Figura 56.

A lista dos equipamentos é mostrada a seguir:

- Decibelímetro (Figura 58 – b) – decibelímetro digital AKROM modelo KR833;
- Câmera – Sonda de inspeção Boroscópio BMAX;
- Microfones de eletreto (Figura 58 – e): Panasonic MW 61A;
- Sensores de vibração (Figura 58 – c) – disco piezelétrico 35 mm Genie;
- Dispositivo gerador de ruído de impacto (Figura 58 – g) – confeccionado no LCFIS/UENF;
- Equipamento gerador de ruído aéreo (Figura 58 – f) – Alto falante Siemens 8 polegadas, 8 Ohms, 100W;
- Computador *Desktop* (Figura 58 – a) – Processador Intel Pentium 4 CPU 3 GHz. Sistema Operacional 32 Bits;
- *Notebook*: Dell, modelo Inspiron 15, série 7000, Processador Intel Core i7, placa de áudio Realtek;
- Mesa misturadora de áudio – Wattson MXS 8S Áudio Mixer;
- Gerador de função 2MHz – BK Precision, Modelo 3011B;
- Amplificador de potência – Wattson 100W, PRH 260, Professional Multi-Use Head, saída 8 Ohms.

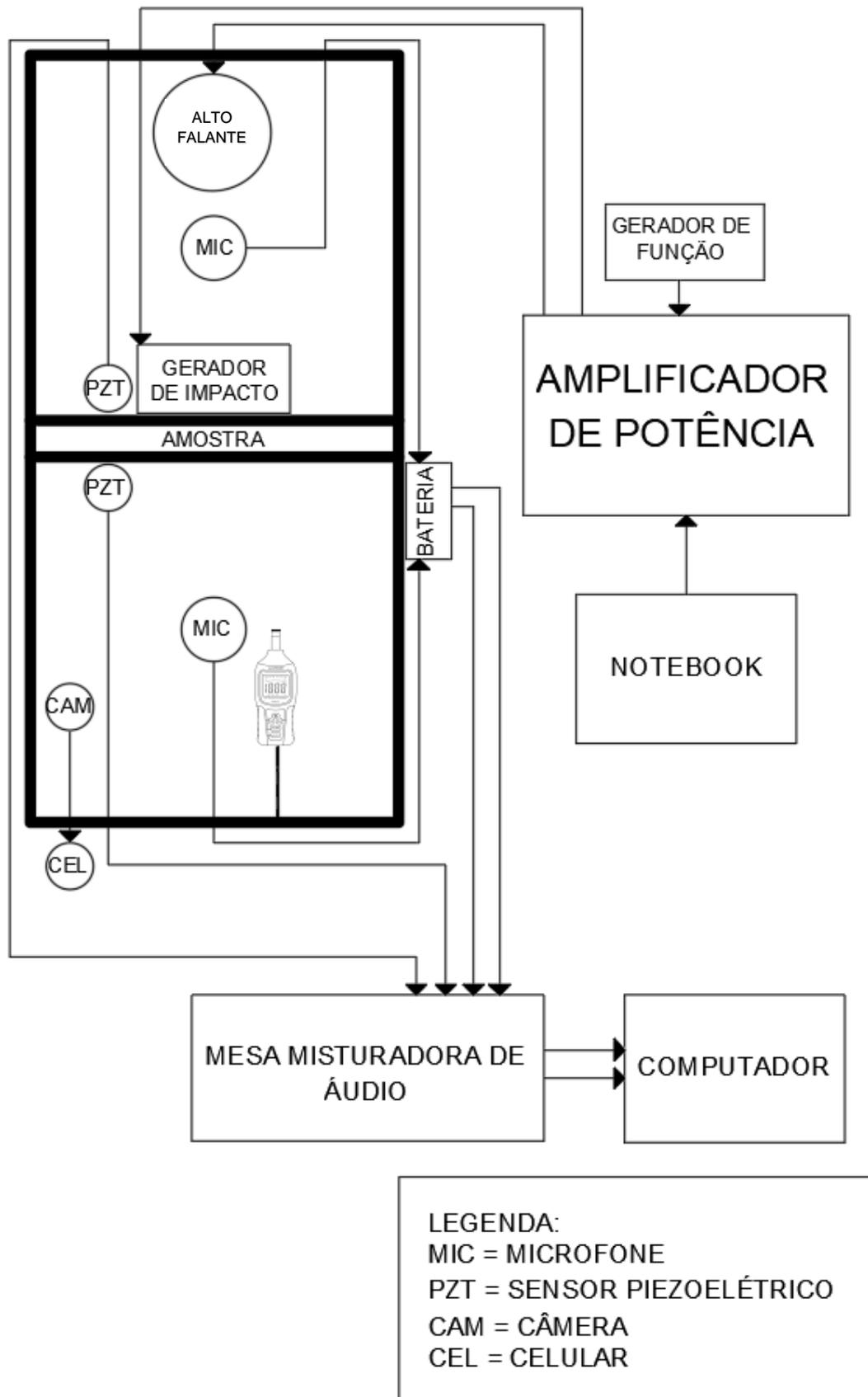


Figura 56 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados no ensaio de desempenho acústico

Fonte: Autoria própria



Figura 57 - Leitura no decibelímetro

Fonte: Autoria própria



Figura 58 - Equipamentos para ensaio acústico (a) computador a esquerda e amplificador de potência a direita, (b) decibelímetro, (c) sensor de vibração, (d) mesa misturadora de áudio, (e) microfones, (f) alto falante, (g) dispositivo gerador de ruído de impacto

Fonte: Autoria própria

Quando o dispositivo gerador de impacto é acionado sobre o contrapiso, o sensor de vibração capta as vibrações, gera um sinal elétrico correspondente às mesmas, que é recebido pelo misturador de áudio e cujas saídas são conectadas às entradas de linha da placa de áudio do computador. Já nos microfones, as ondas sonoras, no ar, são convertidas em sinais elétricos e que seguem o mesmo caminho citado anteriormente para o caso dos sensores de vibração.

O software utilizado para o processamento dos sinais e que os exibe em forma de gráficos, possibilitando a análise dos ensaios, foi o “DSSF3 (*Diagnostic System for Sound Fields Version*) - *Realtime Analyzing System*” (Figura 59).

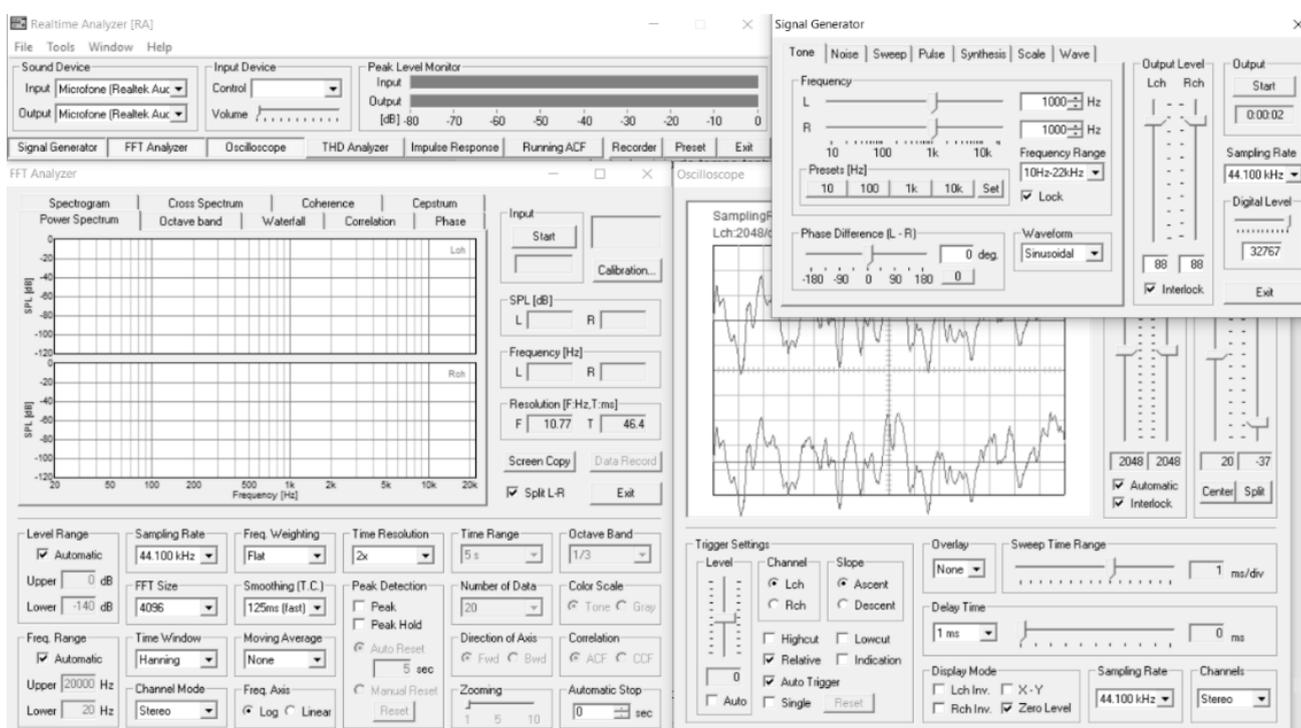


Figura 59 - Software Realtime Analyzing System

Fonte: Autoria própria

Os sistemas de pisos foram posicionados na câmara com o auxílio de uma ponte rolante e uma cinta (Figura 60).

Os resultados desses ensaios foram comparados com os limites que constam na NBR 15575 (ABNT, 2013) para a avaliação de quanto é a atenuação devido à incorporação do pó de borracha visando o aprimoramento do desempenho acústico de contrapisos. Esses limites estão expostos na Tabela 12 e na Tabela 13. Vale ressaltar que a medida de desempenho acústico realizada no presente trabalho, é de cunho relativo, ou seja, visa comparar as

respostas acústicas dos contrapisos com adição de pó de borracha em relação à referência (sem borracha), e não um valor absoluto ou coeficiente de absorção sonora.



Figura 60 – Posicionamento da laje + contrapiso na câmara feito através de ponte rolante

Fonte: Autoria própria

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da areia

A Tabela 20 apresenta a composição química da areia. É possível observar que ocorre a predominância de SiO_2 (quartzo). A Al_2O_3 está presente nas formas de gibsita e caulinita, conforme indicado na Figura 61. O Fe_2O_3 (hematita) é um óxido de ferro de ocorrência frequente em solos e rochas. A areia ainda apresenta teor de K_2O devido à presença de feldspato potássico (microclina). A presença de MgO na areia evidencia a presença de montmorilonita, porém na difração de raio X esse mineral não foi identificado.

Tabela 20 - Composição química da areia

Óxidos	(%)
SiO_2	60,82
Al_2O_3	20,47
Fe_2O_3	4,6
K_2O	2,21
TiO_2	1,63
MgO	1,2
CaO	0,64
ZrO_2	0,24

Fonte: Autoria própria

A Figura 61 apresenta o difratograma de raios X da areia. Pode ser observado que a areia é predominantemente constituída de quartzo, entretanto também são observados picos característicos correspondentes à caulinita, à gibsita, à mica muscovita e à microclina, mineral do grupo dos feldspatos.

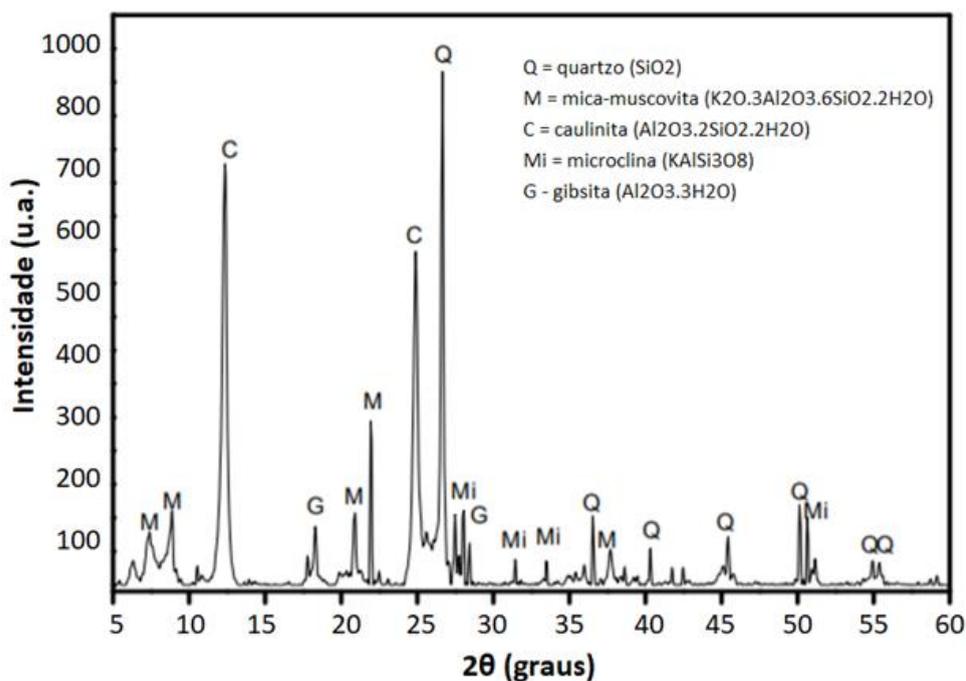


Figura 61 - Difratoograma de raios X da areia

Fonte: Autoria própria

4.2 Caracterização do pó de borracha

A composição química e a perda ao fogo do pó de borracha estão expostas na Tabela 21. O equipamento usado na análise química por espectrometria de fluorescência de raios X não identifica a presença de Carbono. Para isso foi realizado o ensaio de perda ao fogo, onde a maior parte da massa perdida na amostra de resíduo é resultado da liberação de CO_2 . Canova *et al.* (2007) e Andrietta (2002) encontraram a concentração de aproximadamente 75% de C, resultado próximo ao encontrado nessa pesquisa.

Tabela 21 - Composição química do pó de borracha

Metals	(%)
Perda ao fogo	85,8
Zn	9,9
S	3,7
Fe	3,5
Si	2,5
Ca	2,2
Al	1,0
K	0,7
Ti	0,4

Fonte: Autoria própria

O difratograma de raio X da fração abaixo de 74 μm (#200) do pó de borracha está exposto na Figura 62. Através do ensaio de difração de raio X é possível observar cadeias poliméricas amorfas, devido à presença de grande quantidade de carbono. As fases cristalinas encontradas foram poliestireno, sulfato de chumbo, ferro, carbono e sulfeto de magnésio com presença de portlandita, zincita e sulfeto de alumínio e zinco. Deve-se ressaltar que, em consequência de uma composição química complexa, existem outras fases cristalinas, porém de difícil detecção devido à baixa intensidade e sobreposição dos picos.

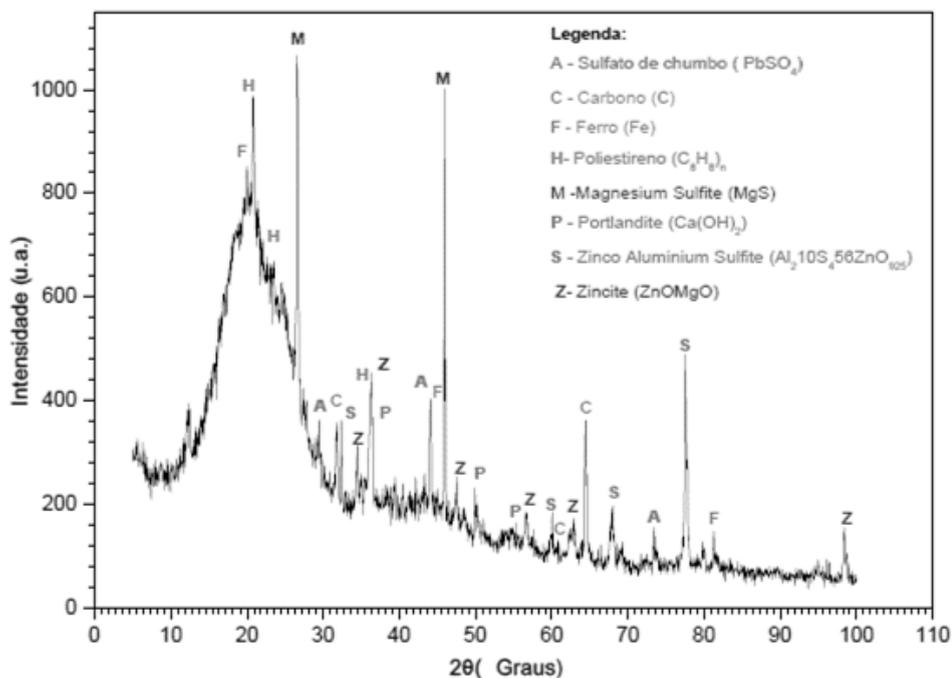


Figura 62 - Difratograma de raios X do pó de borracha

Fonte: FARIA, 2015

Os aspectos morfológicos do pó de borracha foram observados através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme exposto na Figura 63. São observadas partículas de tamanho variado e formato irregular.

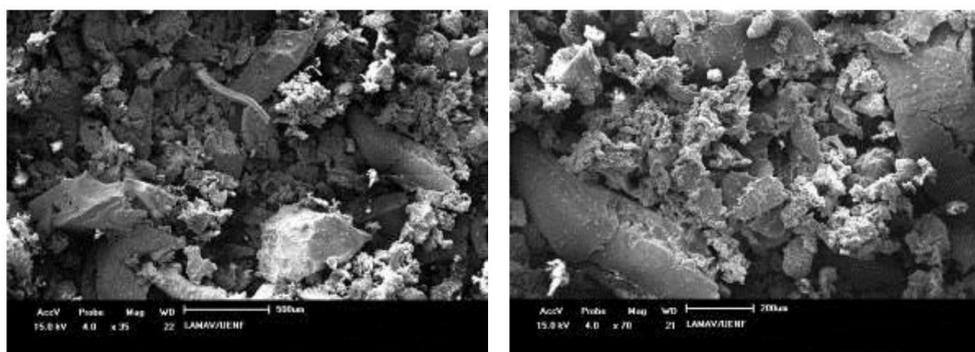


Figura 63 - Micrografias obtidas por MEV do pó de borracha

Fonte: FARIA, 2015

4.3 Granulometria dos agregados

Realizou-se a caracterização física das 5 amostras de agregados por meio das curvas granulométricas (Figura 64) obtidas através do ensaio de granulometria por peneiramento, conforme recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). A partir da Tabela 22 observa-se que as diferentes proporções de agregado são areia média com baixo teor de areias grossa e fina e, à medida em que se aumenta a proporção de pó de borracha incorporada à areia, essas quantidades diminuem ainda mais. Ainda pode ser observado que as porcentagens 0%, 10% e 20%, correspondentes as cores verde, roxa e azul, sobrepõem-se, indicando pouca alteração com a incorporação da borracha.

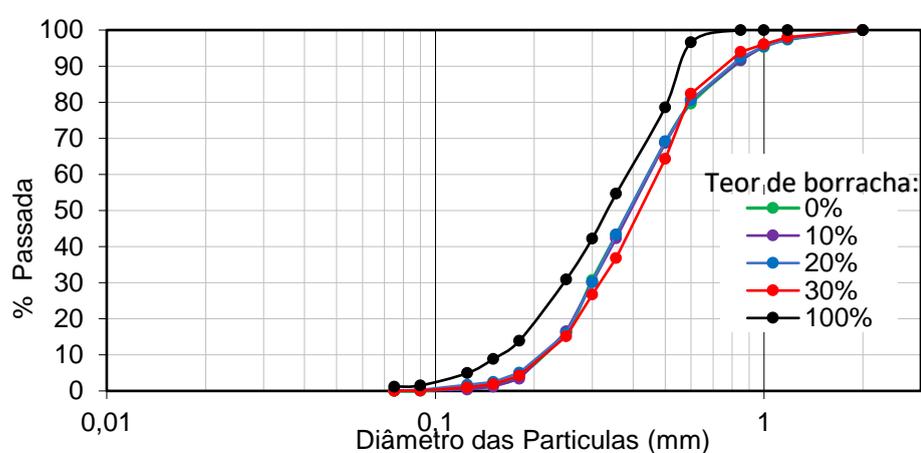


Figura 64 - Granulometria dos agregados

Fonte: Autoria própria

Tabela 22 - Porcentagem das frações granulométricas

Porcentagem	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
0%	16,48	75,08	8,44
10%	16,39	75,15	8,35
20%	15,86	76,36	7,68
30%	15,13	78,84	6,03
Pó de borracha	29,65	69,15	0,00

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 23, muito embora exista diferença no módulo de finura e no diâmetro máximo do pó de borracha em relação à areia, observa-se que essa diferença não altera significativamente os agregados utilizados nas argamassas.

Tabela 23 - Módulo de finura e diâmetro máximo dos grãos

Porcentagem	Módulo de finura (mm)	Diâmetro máximo (mm)
0%	1,90	1,00
10%	1,91	1,00
20%	1,89	1,00
30%	1,91	1,00
100%	1,52	0,60

Fonte: Autoria própria

4.4 Massa unitária dos agregados

Através do ensaio de massa unitária foi elaborada a Tabela 24. Pode-se observar que, à medida em que se aumenta a proporção de pó de borracha na mistura de agregados, há um decréscimo da massa unitária, fato também comprovado por Canova *et al.* (2007) e Fazzan *et al.* (2016).

O valor da massa unitária do pó de borracha está de acordo com o encontrado por PCZIECZEK *et al.* (2019), sendo cerca de três vezes menor do que o valor encontrado para a areia.

Tabela 24 - Massa unitária dos agregados

Porcentagem (%)	Massa unitária (kg/m ³)
0	1570
10	1319
20	1126
30	892
100	421

Fonte: Autoria própria

4.5 Ensaio nas argamassas

Seguem os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas de diferentes proporções, respeitando as respectivas normas de execução.

4.5.1 Densidade de massa no estado fresco

Através do ensaio de densidade de massa com a argamassa ainda no estado fresco, observa-se na Tabela 25, que, seguindo a tendência da massa unitária, os valores diminuem a medida em que se aumenta a quantidade de pó de borracha. Os valores de densidade de massa alcançados neste trabalho apresentam coerência com os valores obtidos por Canova *et al.* (2007).

Tabela 25 - Densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa da argamassa no estado fresco (kg/m ³)
A0	2025,8
A10	1696,3
A20	1461,0
A30	1295,3

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores contidos na Tabela 25 com os valores de referência das Tabela 2 e Tabela 3, espera-se que a propriedade de densidade de massa no estado fresco seja no mínimo 1600 kg/ m³. A argamassa A10 foi a única a atingir esse valor, uma vez que o pó de borracha tem menor massa unitária em relação à areia e a adição desse resíduo de pneus às argamassas aumenta o índice de vazios e assim diminui a densidade de massa no estado fresco.

4.5.2 Teor de ar incorporado

O gráfico da Figura 65 mostra os valores do teor de ar incorporado nas argamassas. Observa-se que houve um aumento no teor de ar incorporado com o aumento da adição do pó de borracha, o que pode ter contribuído também para a queda na densidade de massa no estado fresco.

Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Canova *et al.* (2007) e Pczieczek *et al.* (2019). Segundo os autores citados anteriormente, argamassas com teor de ar incorporado acima de 16% causam excessiva redução na resistência de aderência à tração. Com exceção da argamassa A30, todas as argamassas estão dentro do limite do teor de ar incorporado.

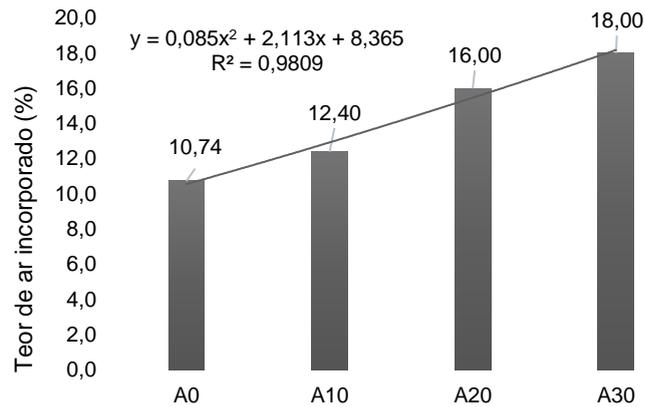


Figura 65 - Teor de ar incorporado

Fonte: Autoria própria

4.5.3 Retenção de água

No gráfico da Figura 66 está ilustrada a propriedade de retenção de água das argamassas com os respectivos teores de adição de pó de borracha, resultados obtidos pela média de quatro determinações.

Os valores que são ligeiramente superiores para as argamassas A10 e A20, em relação à argamassa de referência, ocorrem porque o resíduo de pó de borracha tem granulometria menor em comparação à areia. Isso preenche os vazios entre os grãos, contribuindo com a retenção de água das argamassas citadas. Já na argamassa A30 houve uma queda no valor de retenção. O que também foi demonstrado por Canova *et al.* (2007).

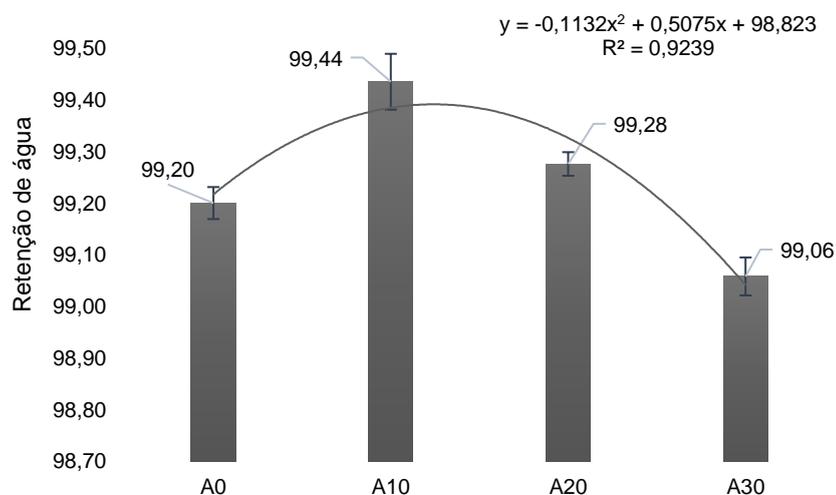


Figura 66 - Retenção de água das argamassas

Fonte: Autoria própria

Todas as proporções estudadas apresentaram excelentes parâmetros de retenção de água. Essa propriedade é de suma importância, uma vez que argamassas que não apresentam retenção de água, usualmente perdem muita água para o substrato sobre o qual estão aplicadas, causando problemas na resistência da argamassa por falta de água para hidratação do cimento.

Comparando os valores obtidos neste ensaio com os valores contido na Tabela 3, pode-se afirmar que todas as argamassas apresentaram a retenção dentro dos limites estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005).

4.5.4 Squeeze-flow

As Figura 67 e Figura 68 indicam as curvas de força x deformação obtidos no ensaio de *squeeze-flow* para as proporções utilizadas nesta pesquisa, de acordo com as duas velocidades de carregamento respectivamente: 3 mm/s, nomeada como velocidade rápida e 0,1 mm/s, nomeada como velocidade lenta.

Comparando as curvas obtidas, com o perfil típico da Figura 29, é possível concluir que a argamassa em questão apresenta pequenas regiões 1 e 2, que é praticamente desprezível em comparação a região 3, devido ao elevado atrito entre os agregados.

Pode-se afirmar, então, que a argamassa estudada é pouco trabalhável e necessita de uma carga maior para que ocorra uma deformação na argamassa. Esse fato é confirmado pela baixa relação água/cimento que uma argamassa de contrapiso deve possuir, tendo em vista que a compactação é feita manualmente com soquete de madeira.

Há um aumento na deformação para uma mesma força à medida em que se aumenta a quantidade de borracha nas amostras. Isso ocorre porque a borracha é mais flexível que a areia natural de rio. Quanto maior o teor de ar incorporado na amostra, como no caso das argamassas com substituição, menor a força compressiva necessária para uma deformação padrão máxima (AZEVEDO *et al.*, 2017).

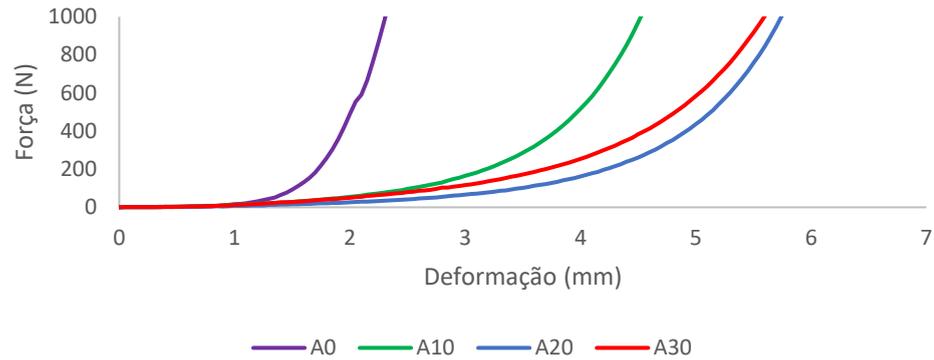


Figura 67 - Curvas *squeeze-flow* rápido

Fonte: Autoria própria

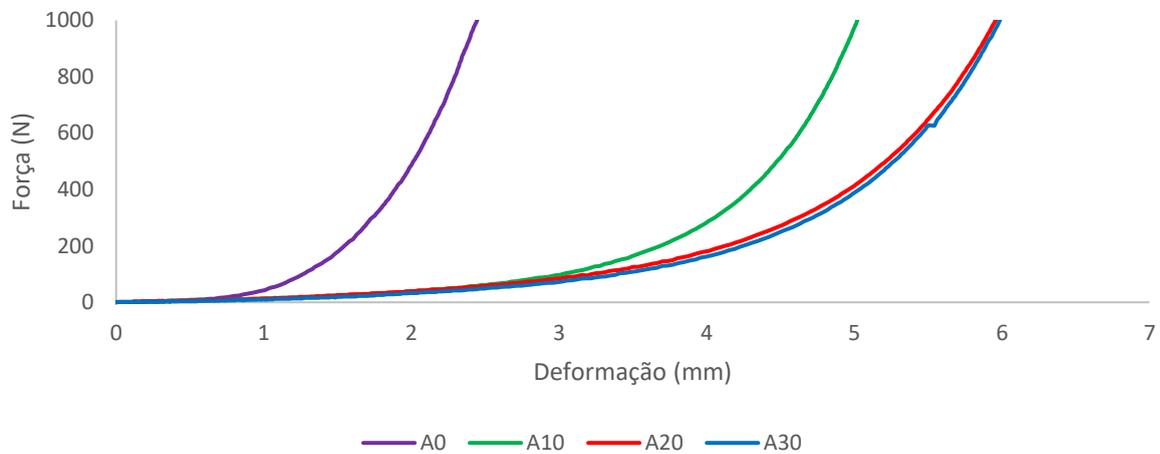


Figura 68 - Curvas *squeeze-flow* lento

Fonte: Autoria própria

4.5.5 Resistência à compressão

Observa-se na Figura 69 que a resistência à compressão axial diminui cerca de 94% na argamassa A30 em comparação à argamassa de referência. Esta redução está ligada ao aumento no teor de ar incorporado que a borracha proporciona às argamassas.

Autores como Segre e Joeques (2000), Albuquerque *et al.* (2008), Pczieczek *et al.* (2019) e Canova *et al.* (2007) observaram essa queda na resistência à compressão das argamassas com a adição de pó de borracha nas misturas

Segre e Joeques (2000) mostraram que o principal problema na utilização do pó de borracha em argamassas é a fraqueza da ligação desse resíduo com a matriz cimentícia, o que causa a redução da resistência do material. A borracha é um material hidrofóbico e, conseqüentemente, quando incorporado em argamassas, cria uma barreira contra a pasta de cimento que impede a reação de hidratação na zona de transição interfacial.

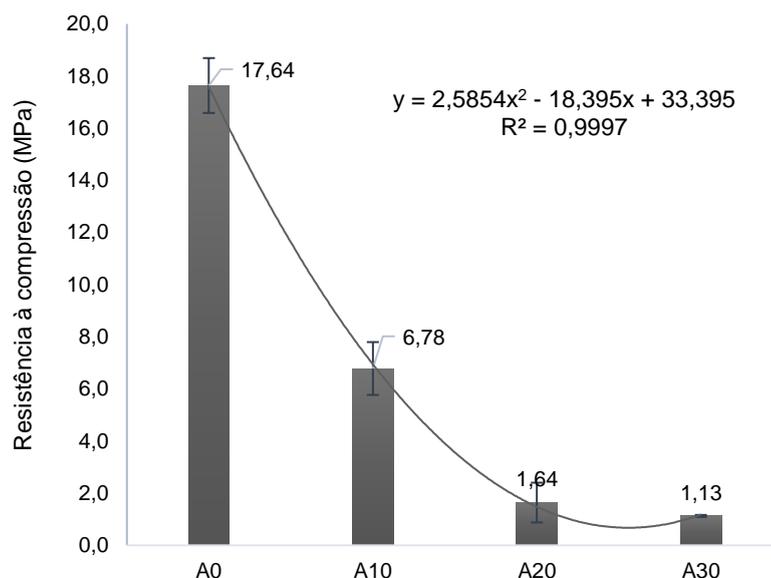


Figura 69 - Resistência à compressão nas argamassas

Fonte: Autoria própria

Segundo Segre *et al.* (2002) devido à estrutura antiaderente da borracha obtida através do uso de materiais à base de zinco na produção de pneus, a borracha não adere à matriz de pasta de cimento, tornando a zona de transição quebradiça, dando origem a microfissuras e, conseqüentemente, reduzindo a resistência mecânica da mistura cimentícia.

Angelin *et al.* (2017) afirma que argamassas com pó de borracha devem ser usadas em estruturas não críticas, como em paredes e em calçadas para pedestres. Quando comparado com elementos feitos com os agregados convencionais, observa-se redução da densidade em elementos com a adição de borracha de cerca de 27%.

Como não existe norma para argamassas de contrapisos, não existe valor de referência para esse parâmetro. O que se espera é que essas argamassas atinjam ao menos 8 MPa, conforme as Tabela 2 e Tabela 3. Esses valores não foram atingidos pelas argamassas com adição de pó de borracha, o que demonstra que ainda são necessários estudos acerca desse resíduo a fim de melhorar as características de aderência a matriz cimentícia na mistura de argamassa.

4.5.6 Resistência à tração na flexão

Pode-se observar na Figura 70 uma acentuada queda da resistência à tração na flexão à medida em que se aumenta o conteúdo de pó de borracha nas argamassas. Essa queda é de aproximadamente 83%, semelhante ao valor encontrado por Canova *et al.* (2007) e por Cruz *et al.* (2002).

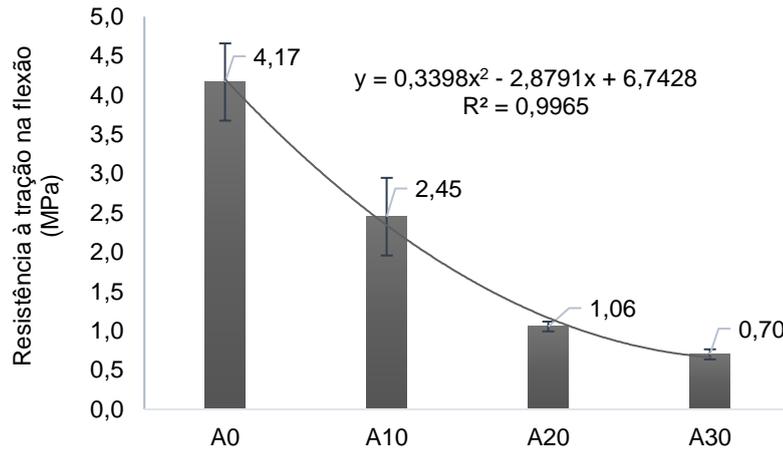


Figura 70 - Resistência à tração nas argamassas

Fonte: Autoria própria

4.5.7 Resistência de aderência à tração

O ensaio de aderência à tração em argamassas foi realizado seguindo o proposto na NBR 13528 (ABNT, 2010), tendo sido realizado em 12 corpos de prova distribuídos de forma aleatória nos contrapisos, respeitando os limites estabelecidos para as margens.

Os corpos de prova que apresentaram ruptura na cola foram descartados, mantendo apenas os resultados cuja ruptura ocorreu na argamassa e no substrato, uma vez que o objetivo do ensaio é avaliar o esforço de tração nesse material.

Na realização deste ensaio foi possível identificar que os resultados de aderência apresentam grande dispersão de dados em função da diferença na aplicação da argamassa e na diferença na força de compactação, mesmo que tenha sido realizado de forma criteriosa e cuidadosa.

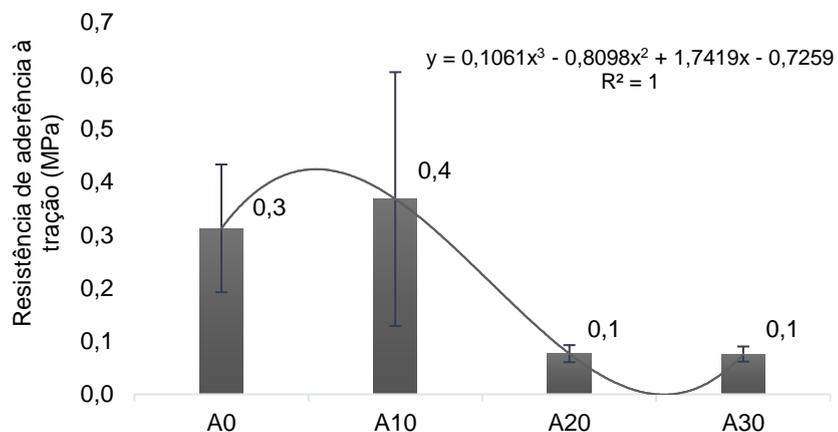


Figura 71 - Resistência de aderência à tração

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores mínimos exigidos em norma (Tabela 3) e dos valores encontrados para argamassas industrializadas (Tabela 2), espera-se que as argamassas de contrapiso possuam ao menos 0,3 MPa de resistência de aderência à tração. Comparando esse valor mínimo com os valores obtidos no ensaio de arrancamento expostos na Figura 71, observa-se que as argamassas A20 e A30 não apresentaram o valor exigido. Muitos dos corpos de prova nessas duas dosagens romperam-se na própria argamassa devido às suas baixas resistências à tração, e isso não permite calcular o verdadeiro valor de resistência de aderência.

Vale ressaltar também que deve ser reformulada a forma de execução deste ensaio, tendo em vista que a altura do contrapiso executado, de 4 cm, pode ter dificultado essa medição, pois os contrapisos, muitas vezes, rompem-se na própria argamassa (Figura 72 - A), e não no que preconiza a norma, que é na interface substrato/argamassa (Figura 72 - B).

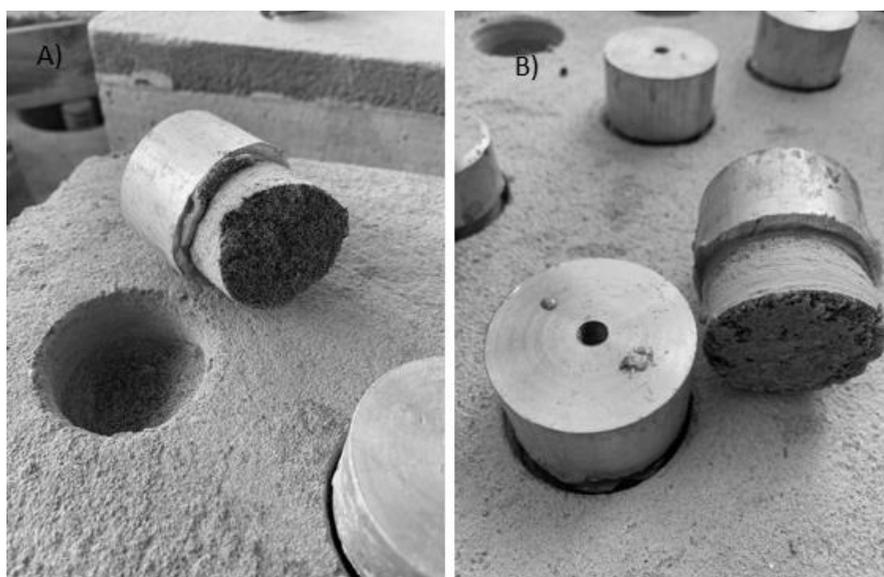


Figura 72 - Rupturas nos corpos de prova. A) Ruptura na argamassa, B) Ruptura na interface substrato/argamassa

Fonte: Autoria própria

4.5.8 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Observa-se no gráfico da Figura 73 que os valores médios obtidos indicam aumento na absorção de água por imersão com o aumento da adição do pó de borracha na argamassa, sendo mais significativo para argamassa A30 com um valor maior cerca de 2,4 vezes que a argamassa de referência.

Angelin *et al.* (2017) encontrou para a argamassa de controle o valor de 7,9% de absorção de água. Esse fato pode ter acontecido porque os autores adicionaram

superplastificante às misturas. A argamassa com 30% de borracha dos autores citados obteve o valor de 32% de absorção, estando de acordo com o encontrado aqui nessa dissertação.

Acompanhando esses resultados, encontram-se os valores do índice de vazios (Figura 74), que também são maiores à medida em que se aumenta da adição do pó de borracha na argamassa. O parâmetro de absorção de água por imersão é de grande importância na análise do desempenho e da durabilidade de argamassas, uma vez que simula a exposição à chuva, à umidade excessiva, à ação proveniente de limpeza e lavagem, entre outros.

Investigações anteriores demonstraram que o índice de vazios aumenta consideravelmente quando um agregado leve é usado, como as partículas de borracha de pneus (ANGELIN *et al.*, 2017; SEGRE e JOEKES, 2000; CANOVA *et al.*, 2007, THOMAS e GUPTA, 2016).

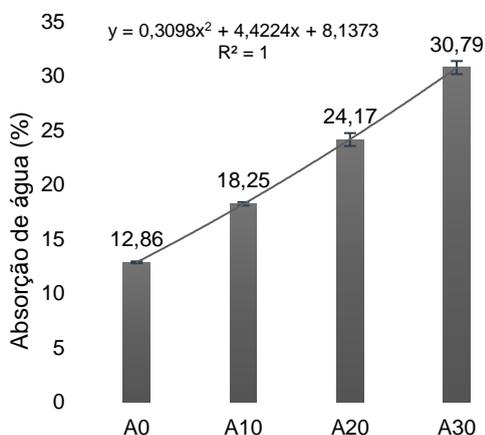


Figura 73 - Absorção de água por imersão
Fonte: Autoria própria

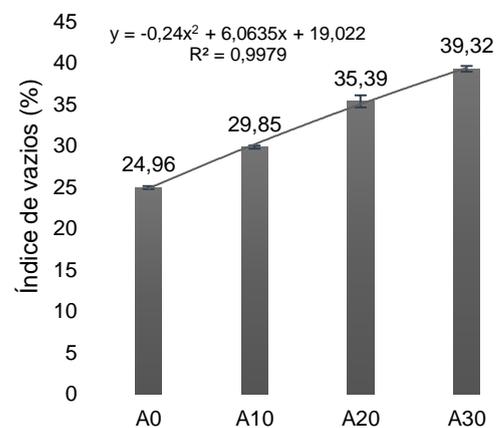


Figura 74 - Índice de vazios
Fonte: Autoria própria

4.5.9 Massa específica

Através do ensaio de absorção de água por imersão foi possível encontrar os valores médios das massas específicas das amostras secas e saturadas e a massa específica real das argamassas.

A Figura 75 mostra que as amostras secas têm uma diminuição da sua massa específica em cerca de 34% para a argamassa A30 em relação a argamassa de referência. Já na Figura 76, as amostras saturadas têm uma diminuição da sua massa específica em cerca de 24% para a argamassa A30 em relação a argamassa de referência. Como há um aumento no índice de vazios na argamassa à medida em que se incorpora o resíduo e uma menor massa específica da borracha em relação a areia, há uma diminuição da massa específica da argamassa proporcional ao aumento da borracha na mistura.

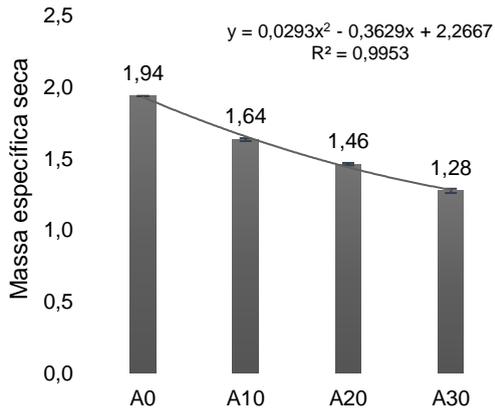


Figura 75 - Massa específica da amostra seca
 Fonte: Autoria própria

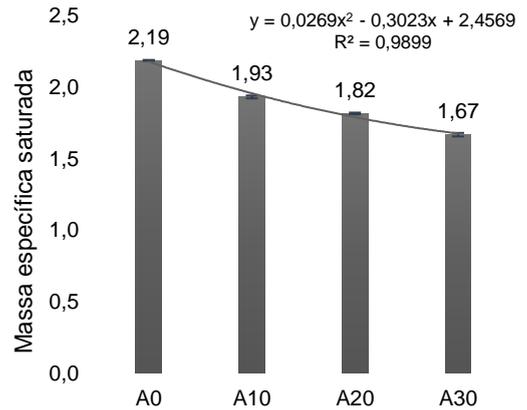


Figura 76 - Massa específica da amostra saturada
 Fonte: Autoria própria

A Figura 77 mostra que existe uma diminuição na massa específica real em cerca de 18% para a argamassa A30 em relação a argamassa de referência. Dentre os valores das massas específicas, a massa específica real é a maior e a que mais mantém estável seu valor com a adição de pó de borracha. Isso ocorre devido à exclusão dos poros permeáveis no cálculo desse valor.

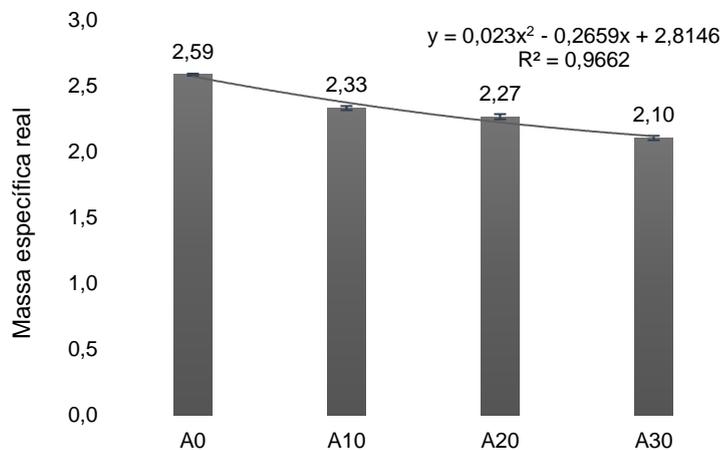


Figura 77 - Massa específica real
 Fonte: Autoria própria

4.5.10 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Na Tabela 26 observa-se, conforme esperado, que acrescentar pó de borracha nas argamassas em substituição à areia, as torna mais leves. Corpos de prova de dimensões idênticas e volumes praticamente iguais, têm suas massas menores em relação à argamassa de referência.

Segundo Di Mundo *et al.* (2018), estes materiais leves devem ser usados para aplicações não estruturais e estão de acordo com as políticas ambientalmente sustentáveis com fim de converter um resíduo sintético em um recurso de engenharia.

Apesar das limitadas propriedades mecânicas da mistura contendo borracha, existe um mercado para produtos de concreto não estrutural com requisitos de resistência média a baixa. Substâncias absorventes do som e barreiras são frequentemente usadas como uma maneira de mitigar o ruído ambiente e fazer uso de um resíduo reciclável (HOLMES *et al.*, 2014).

Tabela 26 - Massas e volumes dos corpos de prova de diferentes proporções

Argamassa	Massa (g)	Volume (cm ³)
A0	504,37	246,41
A10	442,83	246,65
A20	366,76	254,43
A30	331,52	253,33

Fonte: Autoria própria

Na Figura 78 pode-se confirmar essa análise. Há uma queda de cerca de 36% na argamassa A30 em relação a argamassa de referência. Isso está de acordo com os valores do índice de vazios encontrados na seção 4.5.7. Quanto menor a densidade da amostra, maior o índice de vazios.

Essa porcentagem de decréscimo também foi encontrada por Angelin *et al.* (2019). Os autores afirmam que essa redução da densidade da argamassa é atribuída à natureza das partículas de borracha, que repelem a água, retém o ar em sua superfície irregular e áspera, e isso aumenta o número de vazios e, assim, diminui o peso.

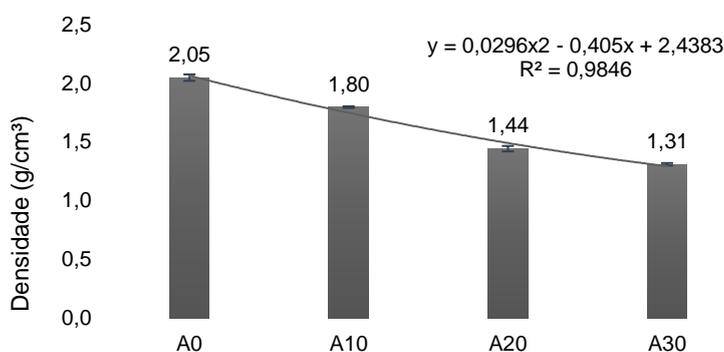


Figura 78 - Densidade de massa aparente no estado endurecido

Fonte: Autoria própria

4.5.11 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 79 estão os corpos de prova após a conclusão do tempo de ensaio de absorção de água por capilaridade e é notável a diferença entre eles. O corpo de prova A0 visualmente absorveu mais água.

A ascensão de um líquido por capilaridade ocorre quando, usualmente, a água movimenta-se pelos poros capilares. Em argamassas esses poros correspondem aos poros com diâmetro entre $0,01\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$. O que causa o movimento ascendente é que a molécula presente no tubo, imediatamente acima da superfície do líquido, atrai a molécula do líquido que começa a subir alinhando-se à molécula que o atraiu. Quando isso acontece, a molécula imediatamente acima atrai o líquido restante e, assim, o ciclo se repete.

A capilaridade representa um dos mais importantes parâmetros de durabilidade para argamassas. Sabe-se que a sucção capilar é um dos mecanismos de transporte mais importantes de entrada de agentes agressivos nos poros das argamassas.



Figura 79 - Corpos de prova no ensaio de capilaridade

Fonte: Autoria própria

A comparação entre os parâmetros calculados estão na Figura 80. Observa-se um elevado desempenho nessa propriedade nas argamassas com adição de pó de borracha. Todos os tratamentos apresentaram desempenho superior a dosagem de referência, indicando que esse parâmetro foi beneficiado com a adição de resíduo de borracha, sendo a argamassa A30 a com melhor desempenho, melhorando cerca de 24 vezes esse parâmetro na argamassa.

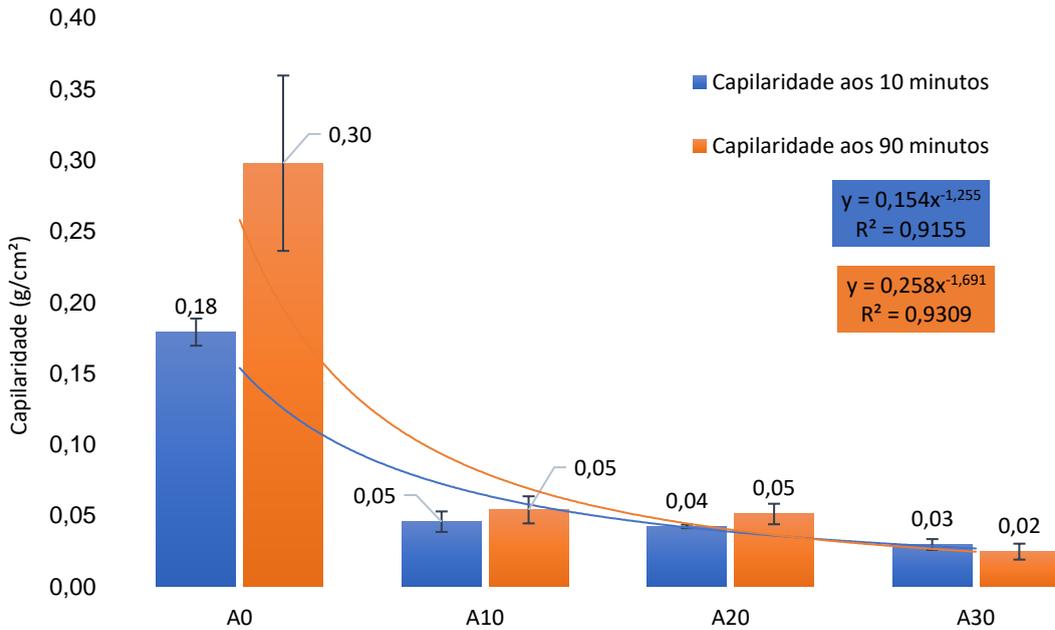


Figura 80 - Absorção de água por capilaridade

Fonte: Autoria própria

Albuquerque *et al.* (2008) concluíram que o uso de borracha de pneus no concreto tende a reduzir a permeabilidade à água. Esse comportamento do material é atribuído à borracha de pneu, que é um material hidrofóbico. O mesmo comportamento ocorreu, como esperado, nos valores de coeficiente de capilaridade (Tabela 27).

Tabela 27 – Coeficiente de capilaridade

Argamassa	C (g/dm.min ^{1/2})
A0	19,0
A10	1,3
A20	1,4
A30	0,8

Fonte: Autoria própria

4.5.12 Difração de raios X

Através dos difratogramas das argamassas expostos na Figura 81, pode ser observada a predominância do mineral quartzo presente na areia. Há ainda a presença da

calcita (carbonato de cálcio), proveniente da carbonatação natural para uma argamassa de 90 dias. Há também a portlandita proveniente da hidratação do cimento.

Pode ser observado também que os teores de materiais amorfos aumentam à medida em que se aumenta a quantidade de pó de borracha na argamassa. Fato já esperado devido à grande quantidade de carbono presente no pó de borracha.

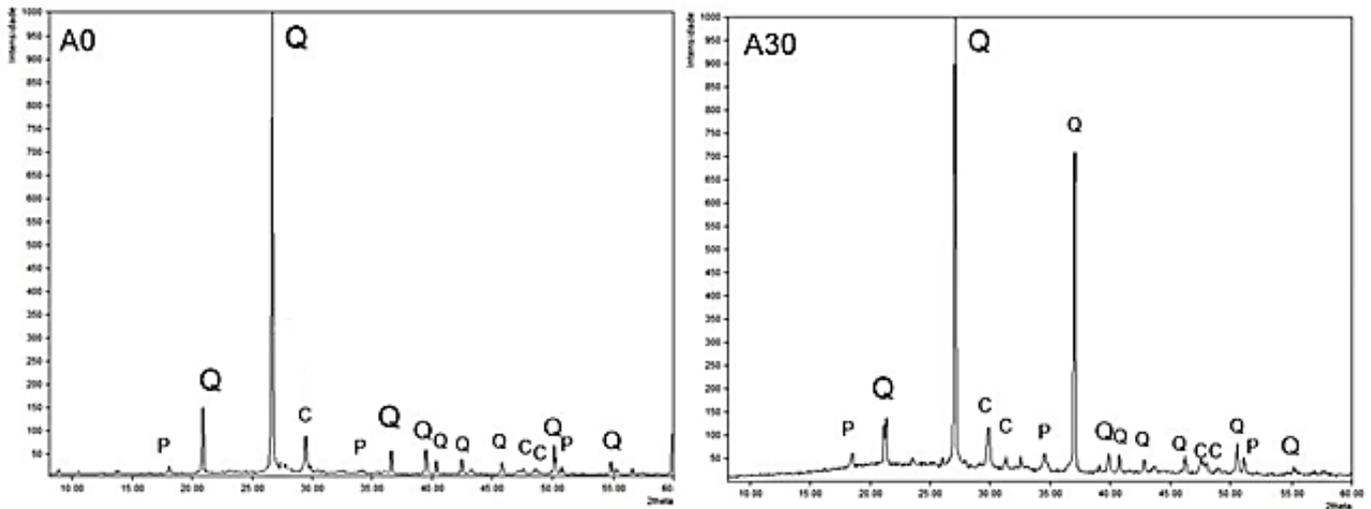


Figura 81 - Digratogramas de raios X das argamassas; Q = quartzo, C = calcita, P = portlandita

Fonte: Autoria própria

4.5.13 Microscopia eletrônica de varredura

Com o objetivo de apoiar os valores encontrados nos ensaios de densidade e resistência à compressão, inspeções microscópicas das misturas foram realizadas usando microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A partícula de borracha na argamassa foi observada no MEV com ampliação de 100 vezes. Como mostrado na Figura 82 – B), a micrografia mostra que a partícula contém superfície rugosa, de forma irregular.

Comparando na Figura 82, as figuras A) e B), observa-se também que a superfície mostra uma descontinuidade na interface borracha / matriz cimentícia, indicando uma má adesão da borracha à pasta de cimento, o que pode ter acarretado ao decréscimo da resistência da argamassa. Esse mesmo resultado foi observado por Segre e Joekes (2000).

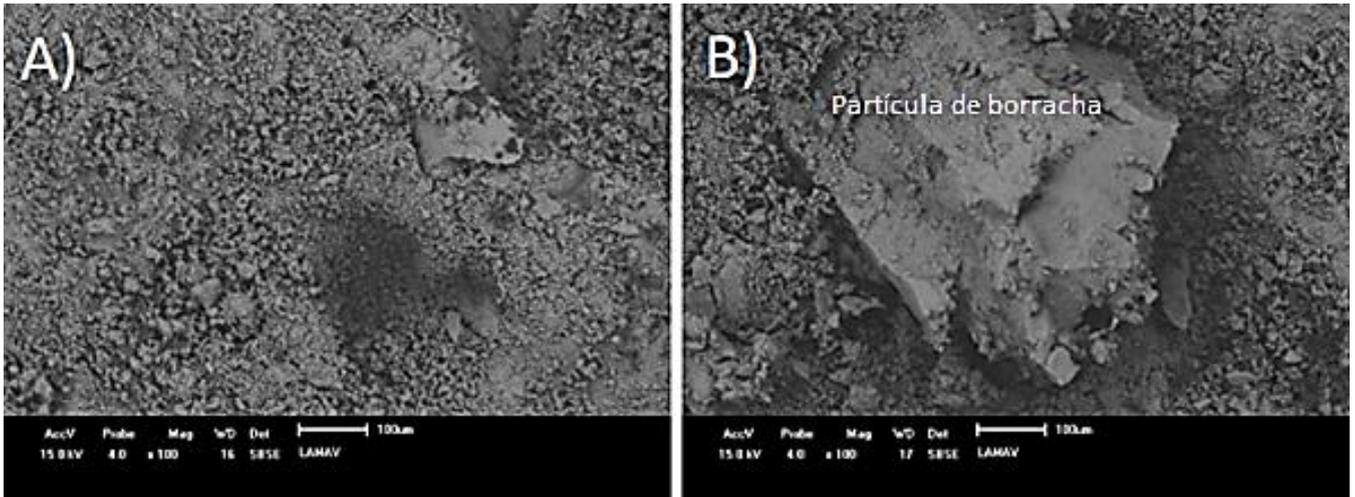


Figura 82 - Ampliação de 100x das argamassas: A) A0; B) A10

Fonte: Autoria própria

Na Figura 83, pode ser observado um grande aumento na quantidade de poros e de seus tamanhos presentes na argamassa à medida em que se aumenta a proporção de pó de borracha.

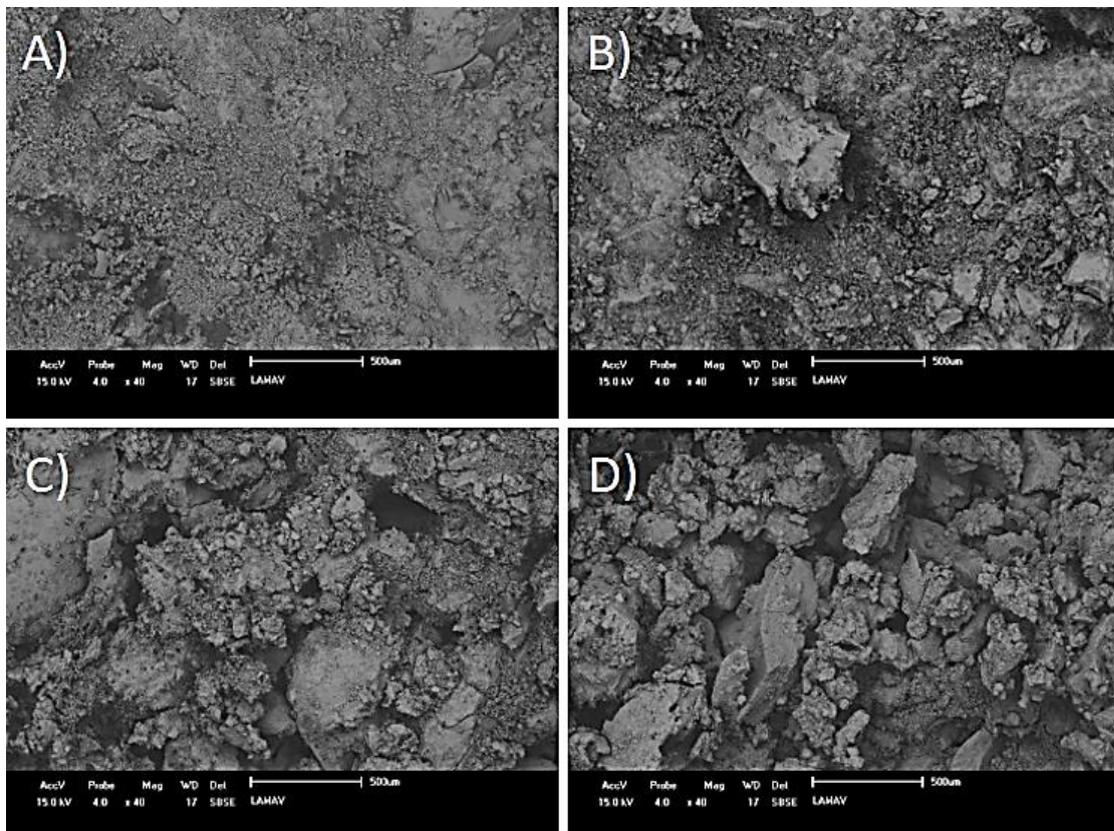


Figura 83 - Ampliação de 40x das argamassas: A) A0; B) A10; C) A20; D) A30

Fonte: Autoria própria

4.6 Ensaio acústico

Os ensaios acústicos nos contrapisos foram realizados na câmara acústica *Arenato* elaborada no LECIV/UENF. Nela foram realizados os ensaios de medição de ruído de fundo, aqui chamados de “vazio” (quando não havia o sistema de piso posicionado), ruído aéreo captado pelo microfone, ruído de impacto captado pelo microfone e ruído de impacto captado pelo sensor piezelétrico.

Vale ressaltar que o decibel não é uma medida absoluta e sim um quociente de unidades que leva em consideração um valor de referência. Trabalhar com grandezas em decibel e exibi-las em gráficos traz grandes vantagens. Uma delas é que o formato de um dado gráfico não se altera caso haja necessidade de serem efetuadas correções, mesmo que posteriormente. Correções de nível sonoro tais como, calibração ou normalização, apenas transladam a curva para cima ou para baixo. Além disso, o dB não é uma grandeza linear, o que significa que em uma escala em decibel, 20 dB é o dobro de 10 dB, mas em relação à intensidade essa diferença equivale a um fator de 10 vezes. Semelhantemente, 30 dB é o triplo de 10 dB, mas em intensidade equivale a um fator de 1000 vezes, assim por diante.

Por isso, para facilitar a análise, os valores do nível de pressão sonora foram normalizados para valores positivos e foram analisadas as frequências mais importantes e audíveis para o ouvido humano, em Hz, que são: 20, 100, 250, 500, 1k, 2k, 3k, 4k, 5k, 10k e 20k.

4.6.1 Câmara acústica vazia

Mesmo na ausência de som, existe o ruído de fundo, que é todo e qualquer ruído proveniente de alguma fonte sonora que foi captado durante o período de medição e que não é proveniente do alto falante nem do dispositivo gerador de ruído de impacto. Existe uma diferença nos valores de ruído de fundo encontrados nos microfones superior e inferior, conforme pode ser visto na Figura 84, que se deve ao fato de, internamente, na parte inferior da câmara, a área ser menor em comparação à superior.

A Figura 85 ilustra a medição dos microfones na câmara acústica vazia, sem a presença do sistema de piso e com o ruído branco sendo emitido pelo alto falante. Observa-se que, embora um sinal de ruído branco possua a mesma intensidade em todas as faixas de frequências, o gráfico resultante não evidencia isto. Isso ocorre porque o alto falante não reproduz de forma plana todas as frequências. Além disso, a própria geometria da câmara interfere na resposta acústica, bem como os materiais no seu interior que absorvem as ondas sonoras emitidas, o que resulta na curva obtida. Essa diferença de nível de pressão sonora nos microfones pode ser mais bem observada na Figura 86. Vale ressaltar também que,

quanto maior a distância da fonte emissora de ondas sonoras, menor é o nível de pressão sonora captado pelo microfone.

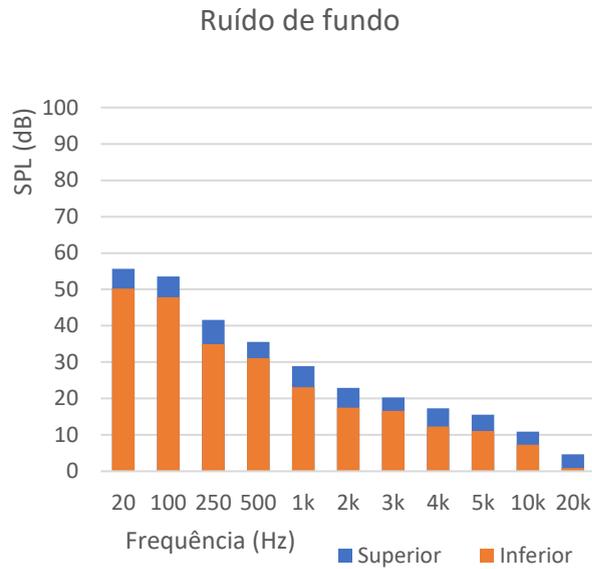


Figura 84 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído de fundo

Fonte: Autoria própria

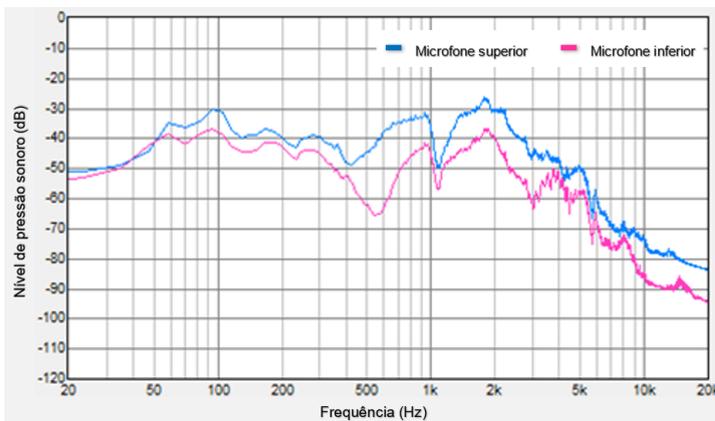


Figura 85 – Medição através de microfones do nível de pressão sonora na câmara acústica vazia com ruído branco sendo emitido

Fonte: Autoria própria

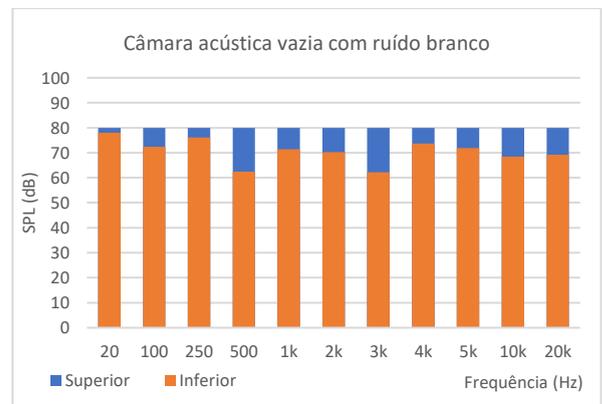


Figura 86 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído branco (normalizados)

Fonte: Autoria própria

4.6.2 Ruído aéreo

Os gráficos de ruído aéreo captados pelo microfone e obtidos a partir do software *Realtime Analyzing* estão expostos na Figura 88 e na Figura 89. Já as diferenças entre as medições obtidas nos microfones superior e inferior estão expostos na Figura 90.

Analisando frequência a frequência, têm-se as seguintes conclusões:

20 Hz – o contrapiso A20 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência;

100 Hz – o contrapiso A20 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência;

250 Hz – o contrapiso A20 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 2 dB em relação ao contrapiso de referência;

500 Hz – os contrapisos A20 e A30 desempenharam melhores resultados, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência;

1 kHz – os contrapisos A10 e A20 desempenharam melhores resultados, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência;

2 kHz – todos os contrapisos desempenharam melhores resultados em comparação ao contrapiso de referência, porém os contrapisos A20 e A30 atenuaram 11 dB;

3 kHz – todos os contrapisos desempenharam melhores resultados em comparação ao contrapiso de referência, porém os contrapisos A20 e A30 atenuaram 9 dB;

4 kHz – todos os contrapisos desempenharam melhores resultados em comparação ao contrapiso de referência, porém o contrapiso A20 atenuou 6 dB;

5 kHz – o contrapiso A10 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 4 dB em relação ao contrapiso de referência. O contrapiso A20 desempenhou resultado inferior ao contrapiso de referência nessa frequência;

10 kHz – todos os contrapisos desempenharam melhores resultados em comparação ao contrapiso de referência, atenuando 2 dB;

20 kHz – os contrapisos A20 e A30 desempenharam melhores resultados, atenuando 2 dB em relação ao contrapiso de referência.

Analisando de forma geral, todos os contrapisos com adição de borracha melhoraram o isolamento ao ruído aéreo entre pisos. Com destaque para os contrapisos A20 e A30 que desempenharam melhores resultados para uma maior faixa de frequências. Esse fato já era esperado, conforme citado pelos autores estudados nessa dissertação, como Mohammed *et al.*, (2012) e Han *et al.* (2008), que afirmaram que quanto maior a porosidade do material, maior a sua absorção sonora.

A Figura 87 mostra as curvas do nível de pressão sonora de todos os contrapisos, sendo que, a fim de facilitar a visualização do desempenho acústico em relação a redução sonora que os contrapisos proporcionam, elas foram normalizadas. O ruído que era emitido

na câmara superior foi normalizado para todas as faixas de frequência, resultando assim em curvas na câmara inferior que indicam o quanto foi atenuado. Observa-se nessa figura que, principalmente para a faixa de frequência dos médios, a medida em que se aumenta a quantidade de borracha nos contrapisos, maior a quantidade de som dissipada por eles. Esse fato já era esperado, conforme demonstrado na Figura 19.

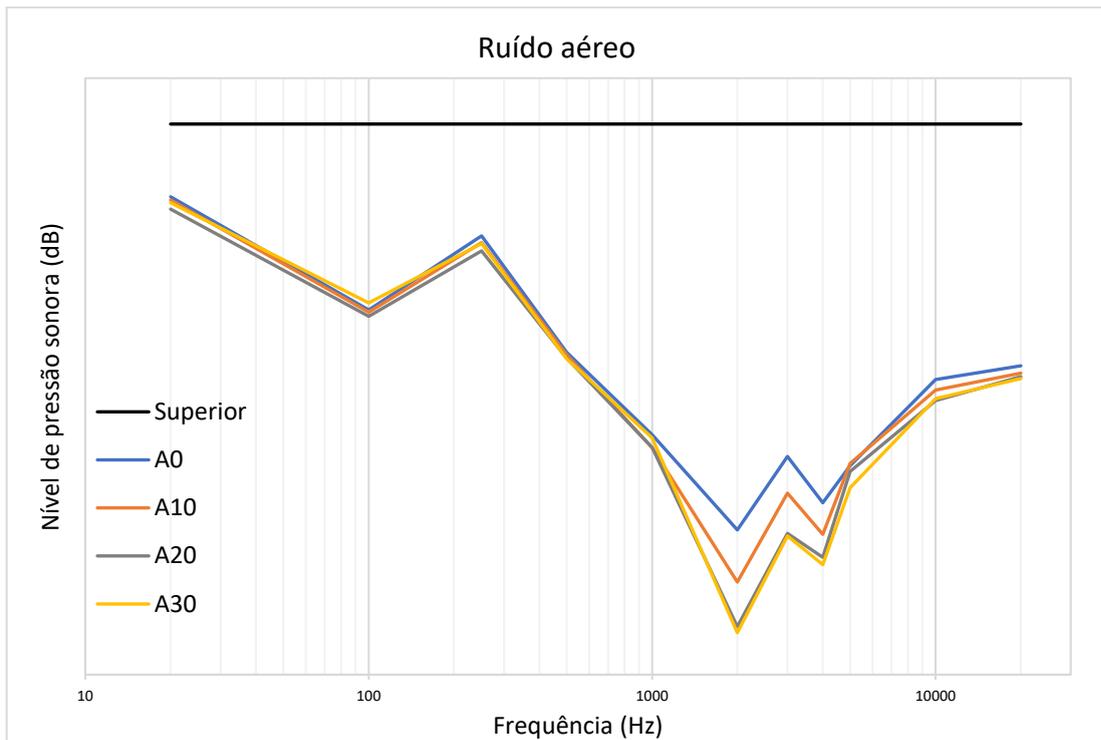


Figura 87 - Curvas normalizadas de pressão sonora medidas no ensaio de ruído aéreo
Fonte: Autoria própria

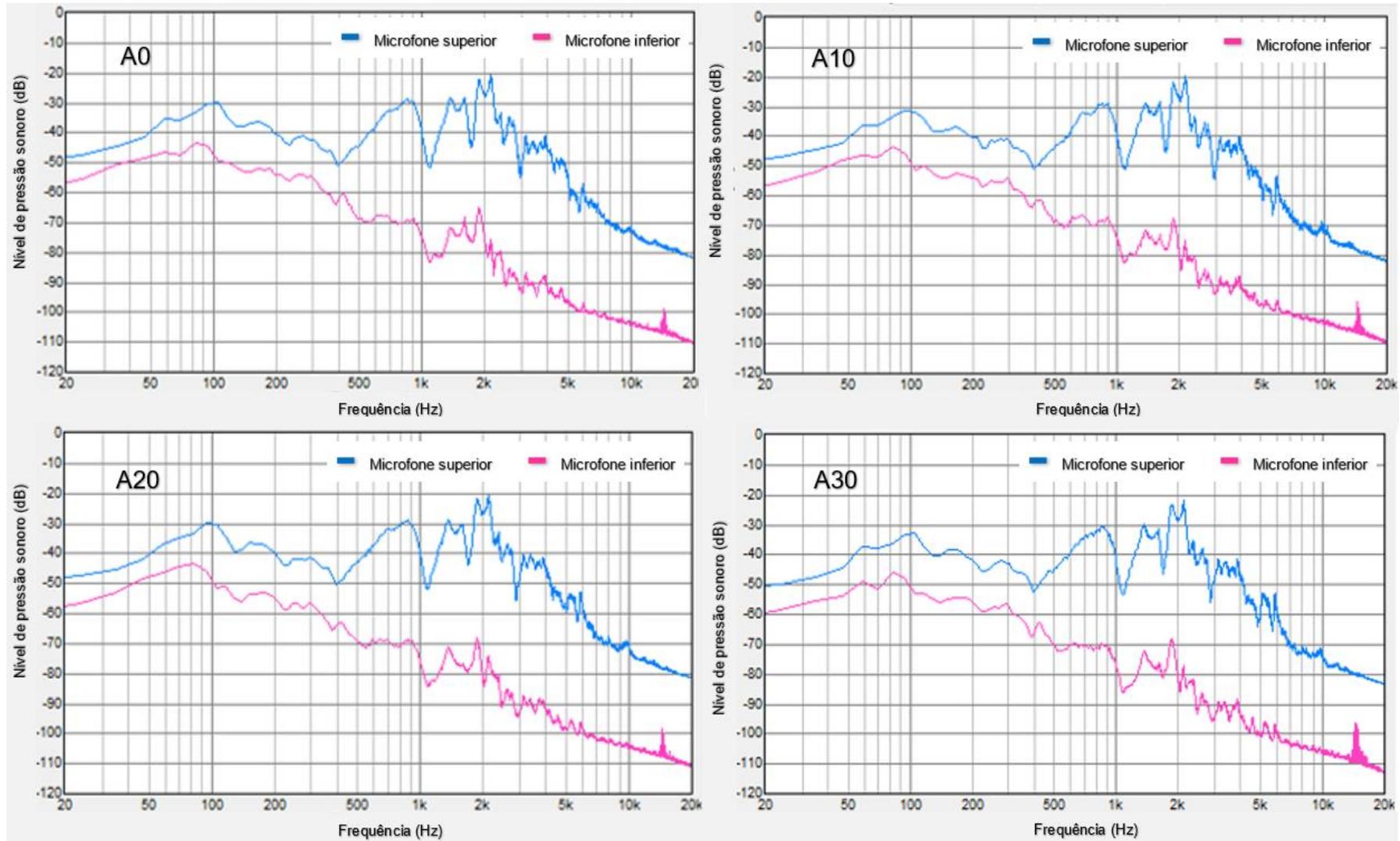


Figura 88 - Ensaios de ruído aéreo

Fonte: Autoria própria

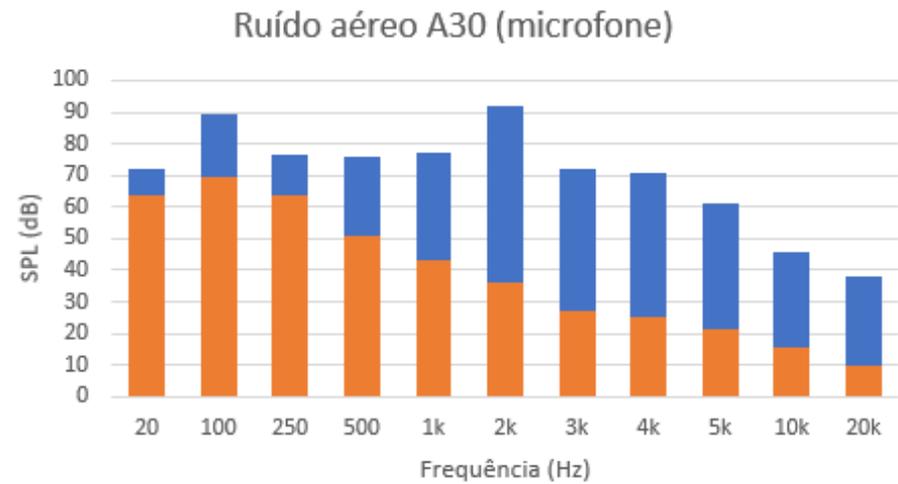
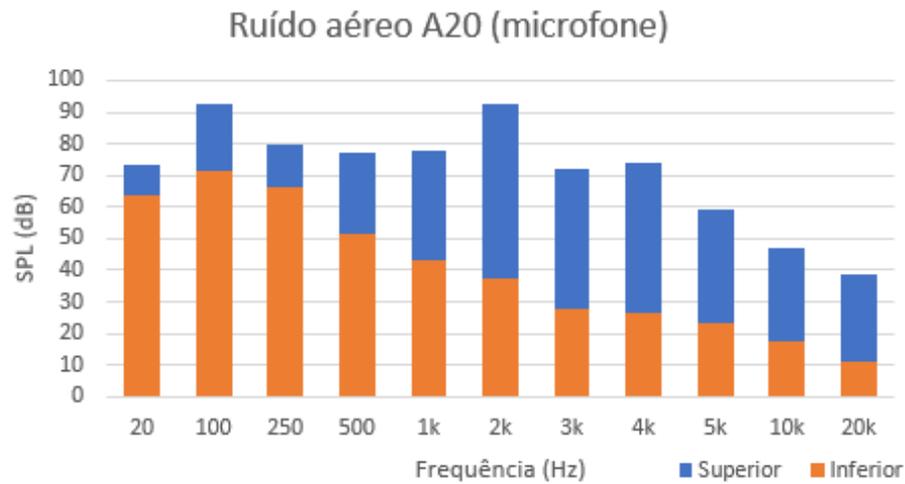
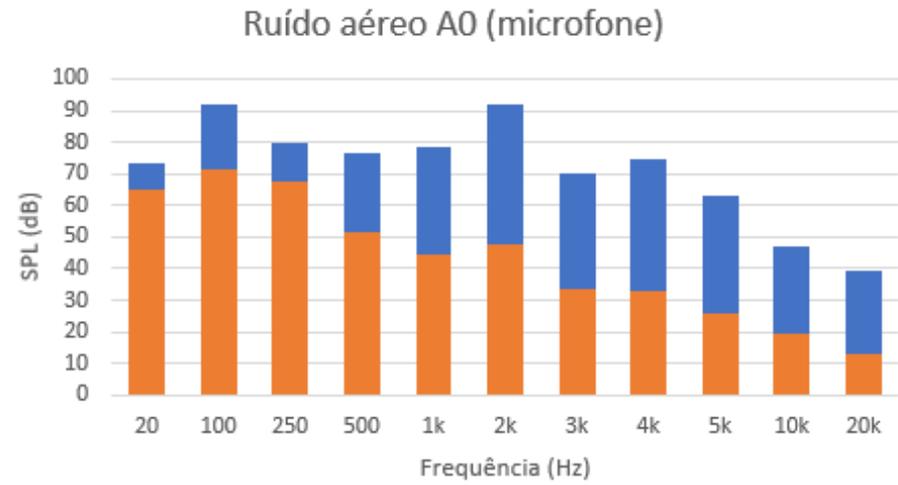
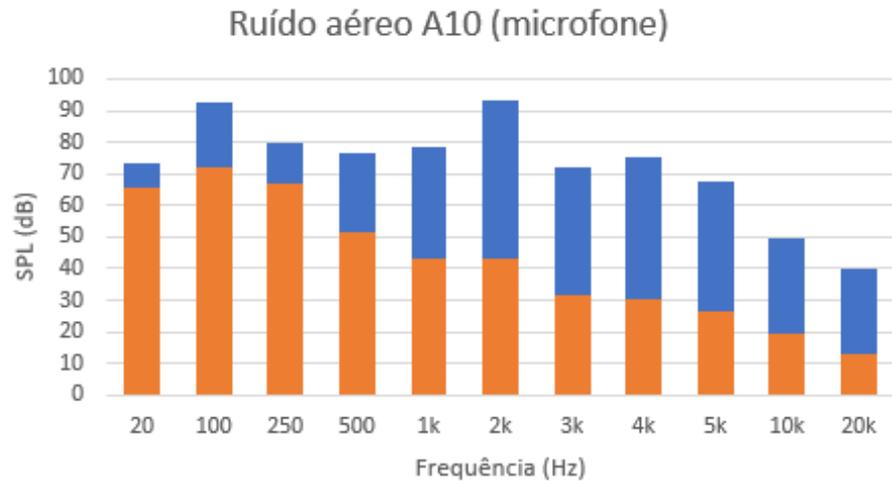


Figura 89 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído aéreo
 Fonte: Autoria própria

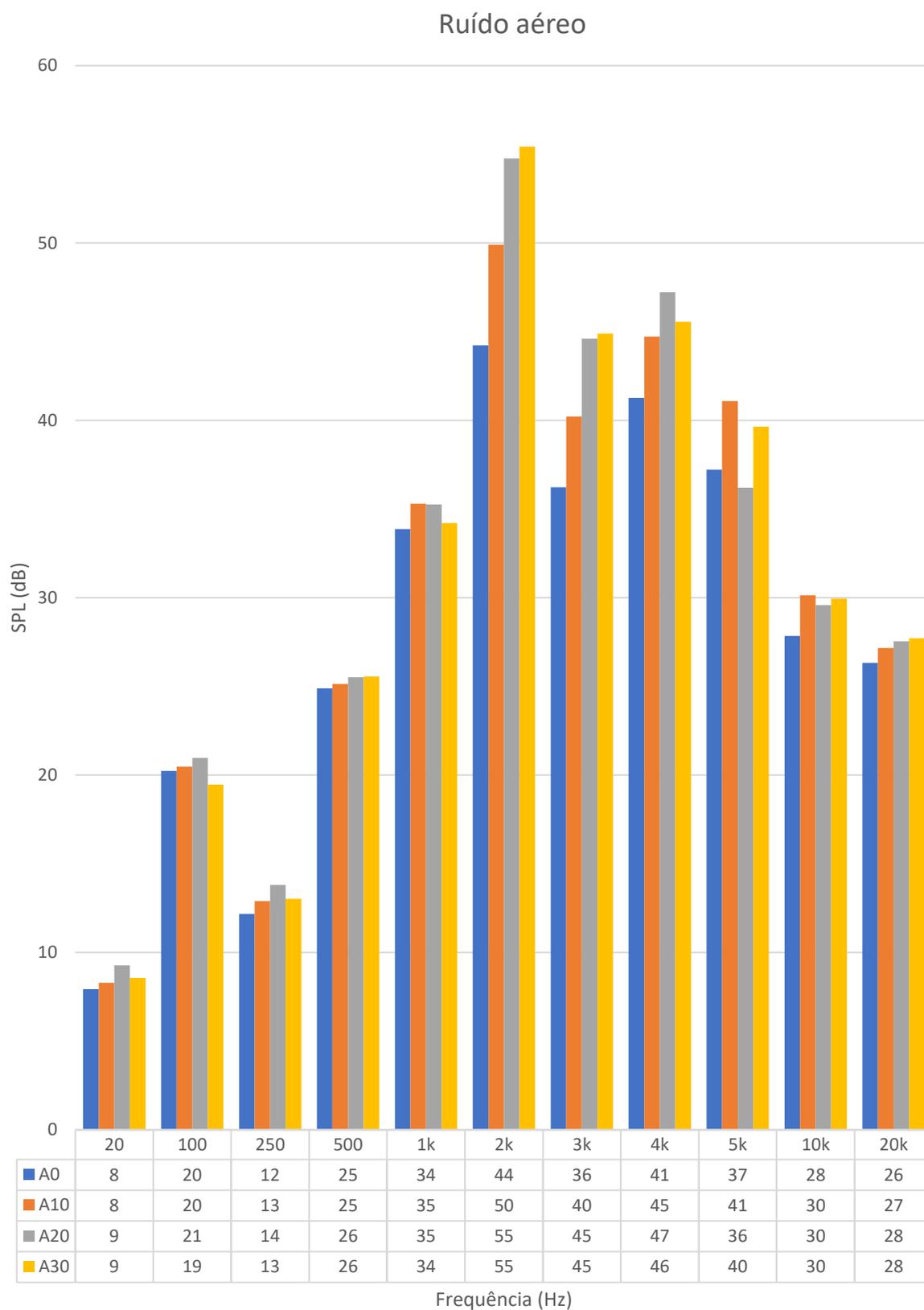


Figura 90 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído aéreo nos contrapisos estudados

Fonte: Autoria própria

4.6.3 Ruído de impacto

Para a medição do ruído de impacto, foram feitas duas análises: a partir dos microfones, que mede o que se pode ouvir desses impactos causados sobre os contrapisos, e a partir dos sensores piezelétricos, que captam as vibrações no sistema de pisos.

4.6.3.1 Medição realizada pelo microfone

Os gráficos de ruído de impacto captados pelos microfones e obtidos a partir do software *Realtime Analyzing* estão expostos na Figura 91 e na Figura 92. Já as diferenças entre as medições obtidas nos microfones superior e inferior estão expostas na Figura 93.

Analisando frequência a frequência, chegam-se as seguintes conclusões:

20 Hz – o contrapiso de referência foi superior nessa frequência, sendo pior para os contrapisos com adição de resíduo de pneu;

100 Hz – o contrapiso de referência foi superior;

250 Hz – o contrapiso de referência foi superior;

500 Hz – o contrapisos A30 desempenhou melhor resultado, atenuando 4 dB em relação ao contrapiso de referência;

1 kHz – o contrapiso de referência foi superior;

2 kHz – o contrapiso A20 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência. O contrapiso A10 desempenhou resultado inferior ao contrapiso de referência nessa frequência;

3 kHz – o único contrapiso que desempenhou melhor resultado em comparação ao contrapiso de referência foi o contrapiso A10, que atenuou 1dB;

4 kHz – o único contrapiso que desempenhou melhor resultado em comparação ao contrapiso de referência foi o contrapiso A20, que atenuou 3dB;

5 kHz – os contrapisos A0 e A20 desempenharam melhores resultados;

10 kHz – os contrapisos A0 e A20 desempenharam melhores resultados;

20 kHz – os contrapisos A10 desempenhou melhor resultado em comparação ao contrapiso de referência, atenuando 1 dB.

Analisando de forma geral, o contrapiso de referência foi o que desempenhou o melhor resultado para uma maior faixa de frequências em relação ao ruído de impacto medido pelo microfone, seguido do contrapiso A20.

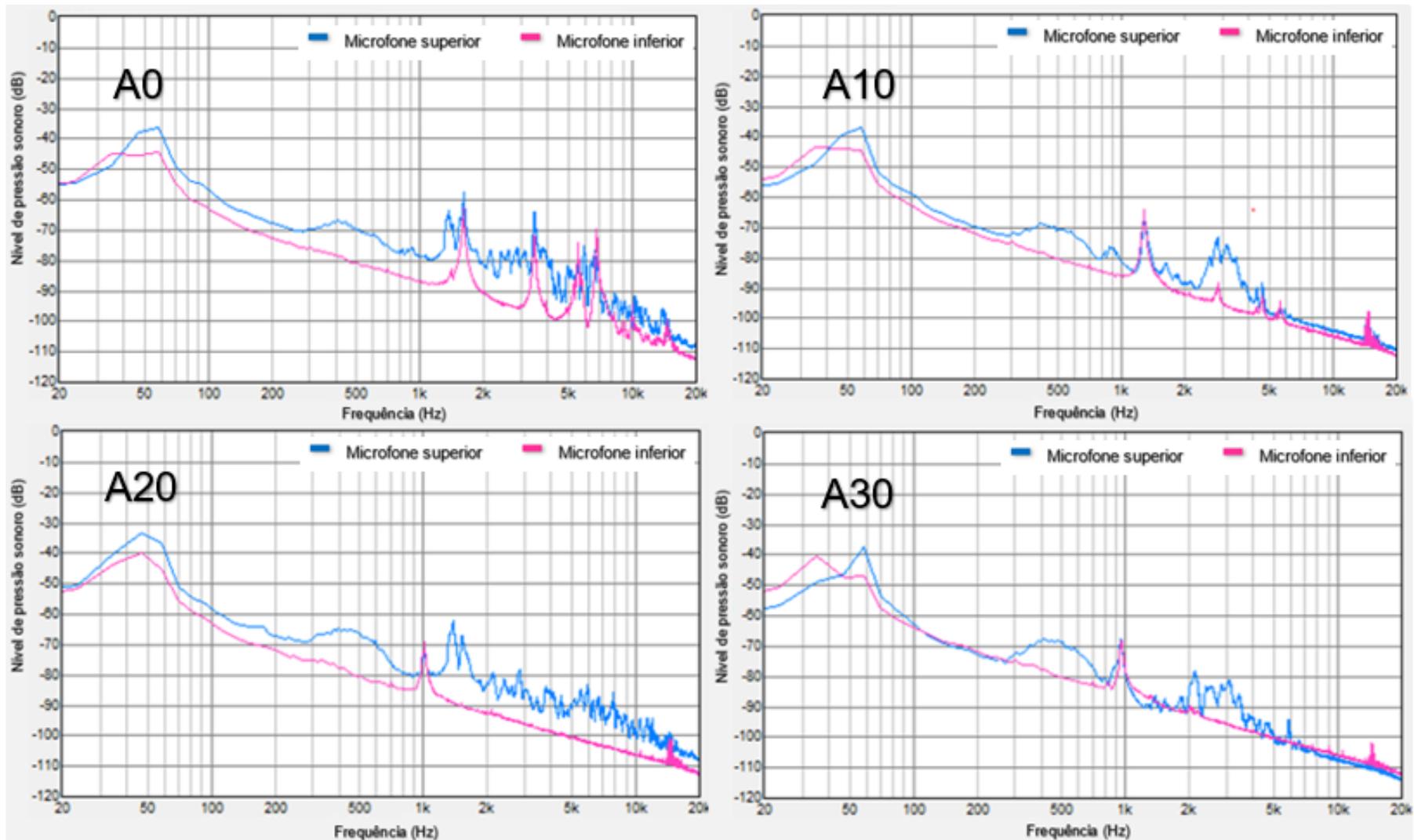


Figura 91 – Ensaio de ruído de impacto medidos pelos microfones

Fonte: Autoria própria

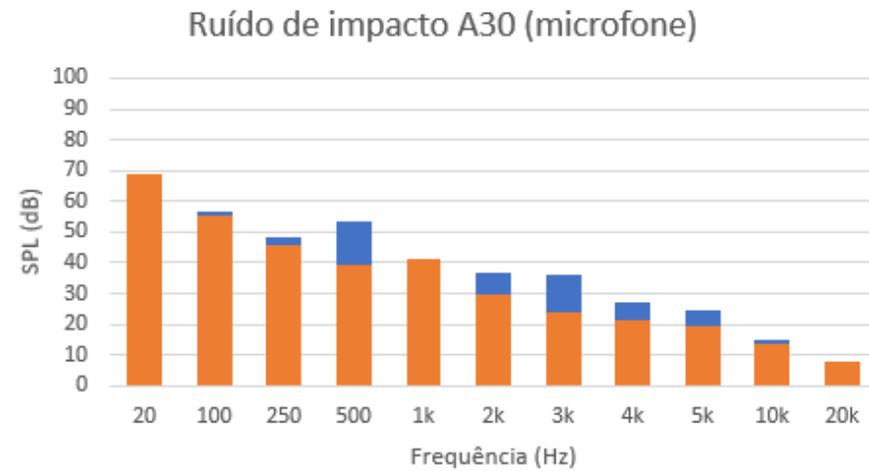
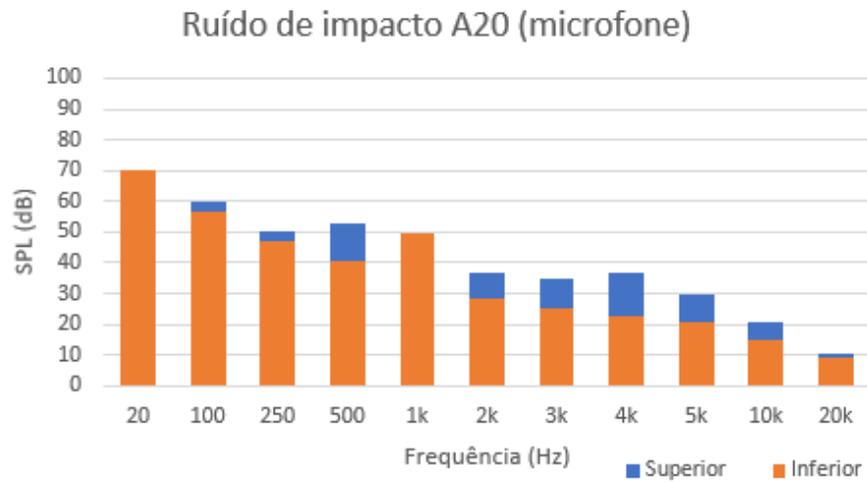
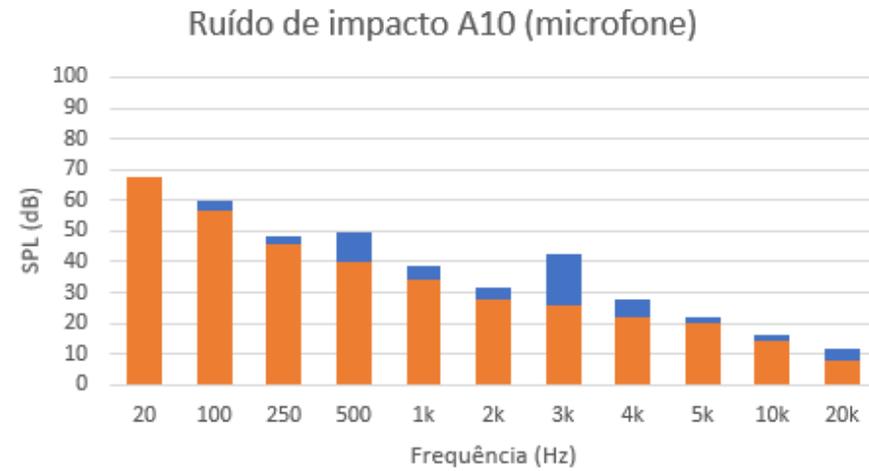
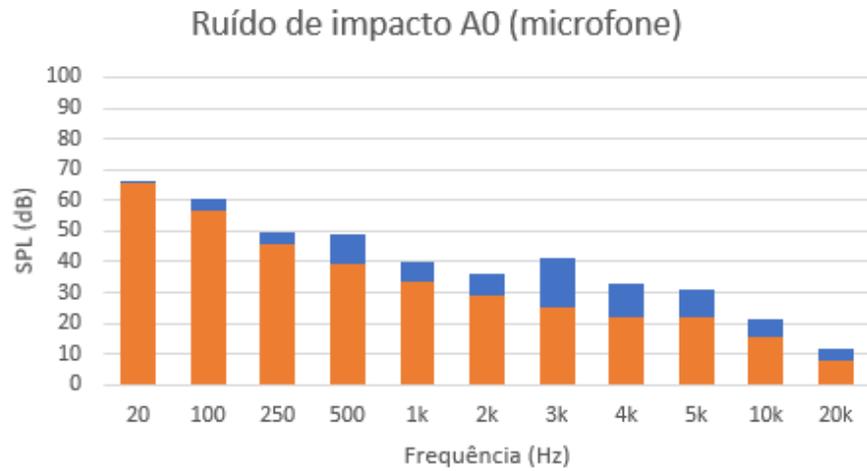


Figura 92 - Análise dos microfones superior e inferior no ruído de impacto

Fonte: Autoria própria

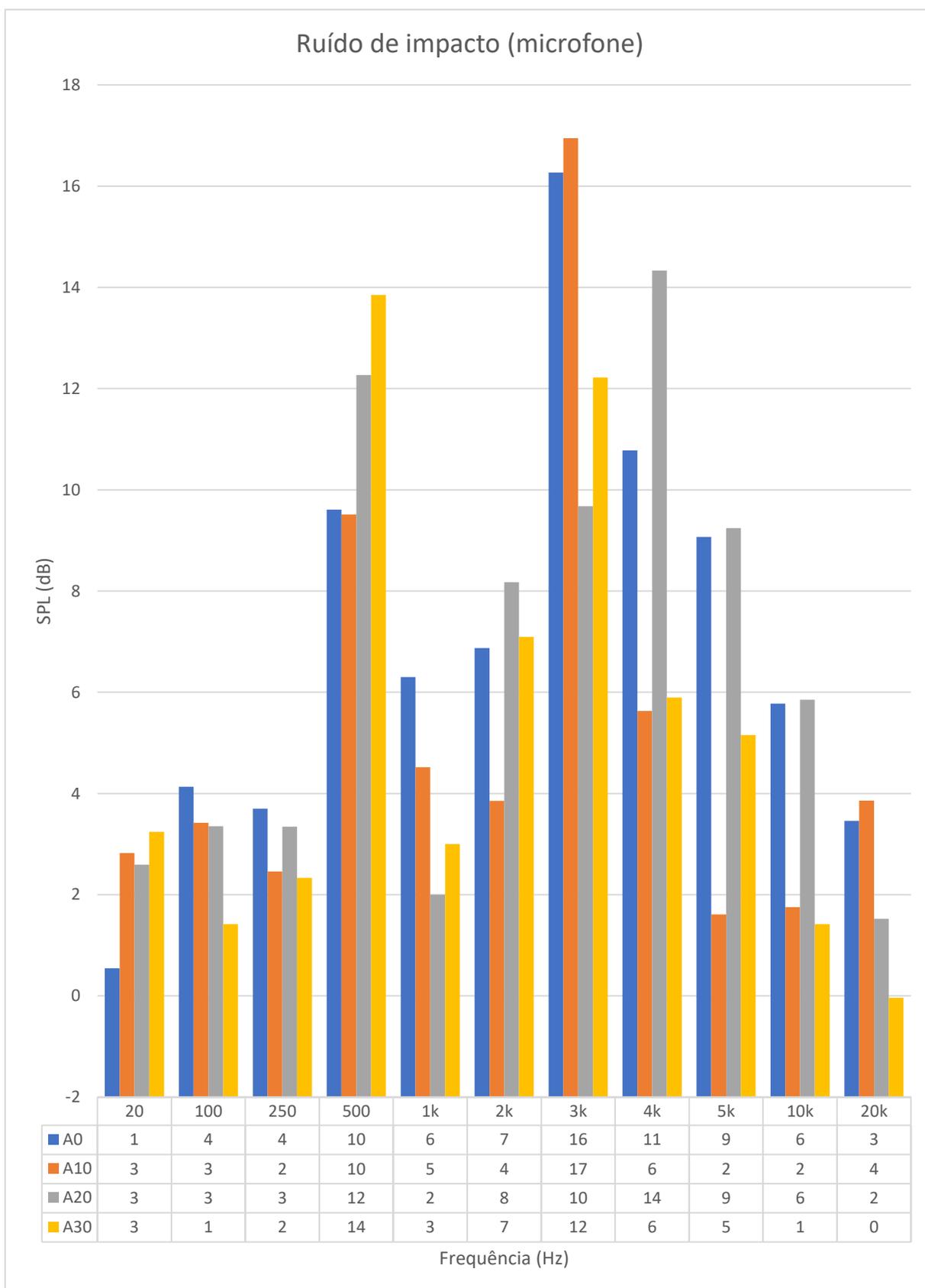


Figura 93 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído de impacto nos contrapisos estudados captados pelos microfones

Fonte: Autoria própria

4.6.3.2 Medição realizada pelo piezelétrico

Os gráficos de ruído de impacto captados pelos sensores piezelétricos e obtidos a partir do software *Realtime Analyzing* estão expostos na Figura 94 e na Figura 95. Já as diferenças entre as medições obtidas nos sensores superior e inferior estão expostos na Figura 96.

Analisando frequência a frequência, chegam-se as seguintes conclusões:

20 Hz – o contrapiso A10 foi o que desempenhou o melhor resultado, atenuando 1 dB em relação ao contrapiso de referência;

100 Hz – o contrapiso A10 foi superior, atenuando 9 dB em relação ao contrapiso de referência;

250 Hz – o contrapiso A10 foi superior, atenuando 3 dB em relação ao contrapiso de referência;

500 Hz – nessa frequência o contrapiso A30 desempenhou o melhor resultado;

1 kHz – o contrapiso de referência foi superior;

2 kHz – o contrapiso de referência foi superior, seguido do contrapiso A30;

3 kHz – nessa frequência o contrapiso A30 desempenhou o melhor resultado, atenuando 5 dB;

4 kHz – o contrapiso A30 desempenhou o melhor resultado, atenuando 12 dB;

5 kHz – o contrapiso A20 desempenhou melhor resultado atenuando 11 dB, seguido do contrapiso A30;

10 kHz – o contrapiso A20 desempenhou o melhor resultado, atenuando 1 dB;

20 kHz – o contrapiso de referência foi superior.

Nesses ensaios, o que está sendo medido e captado pelos sensores piezelétricos é a variação do contrapiso. Essas vibrações são diferentes para cada um dos contrapisos devido a variação nas suas dosagens. Analisando de forma geral, o resultado deste ensaio foi o que obteve maior dispersão nos valores para as diferentes frequências. Nas frequências graves, o contrapiso A10 desempenhou melhor resultado. Nas frequências médias, o contrapiso A30 obteve melhor resultado. E nas frequências agudas, o contrapiso A20.

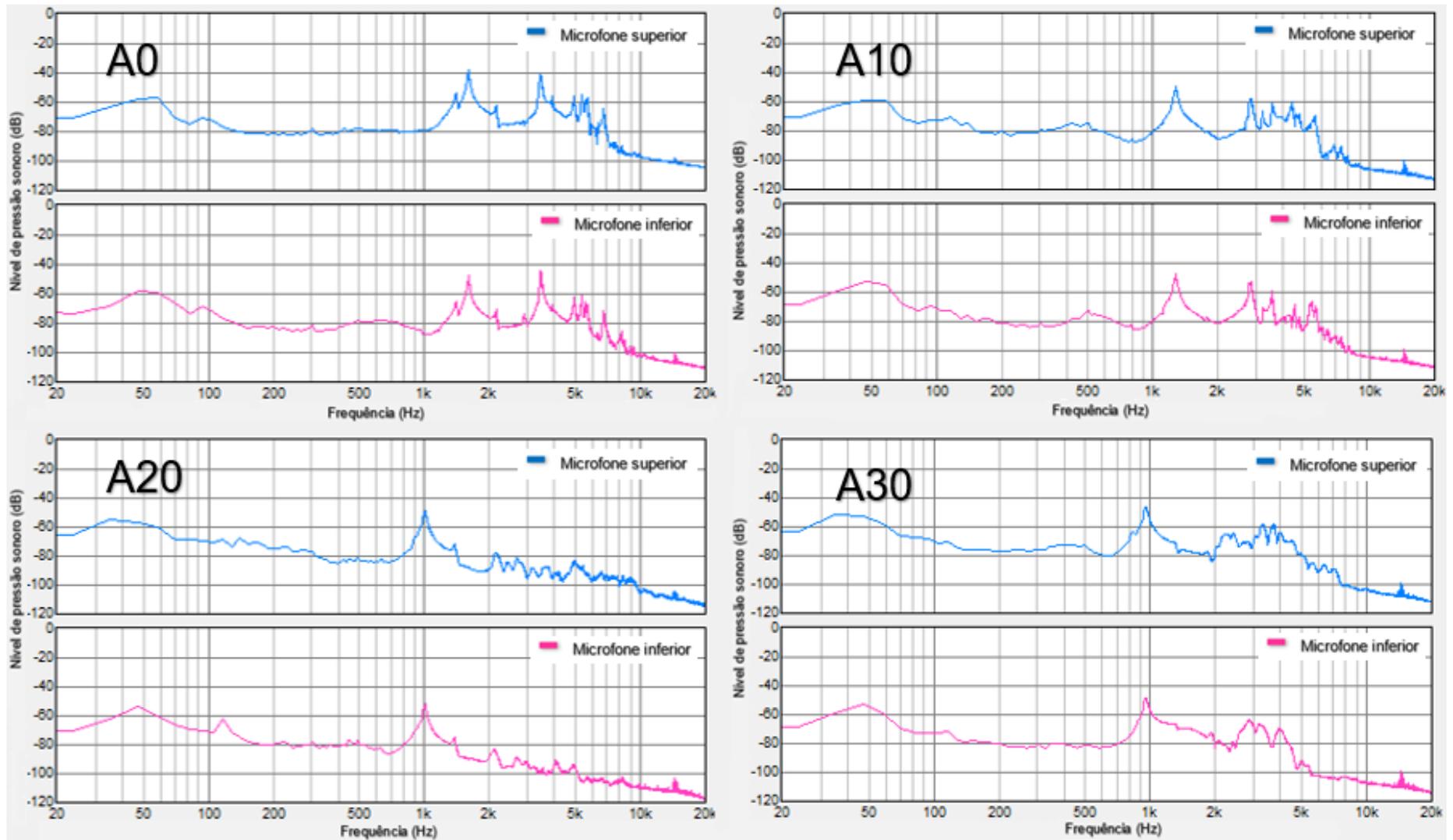


Figura 94 - Ensaio de ruído de impacto medidos pelos piezelétricos

Fonte: Autoria própria

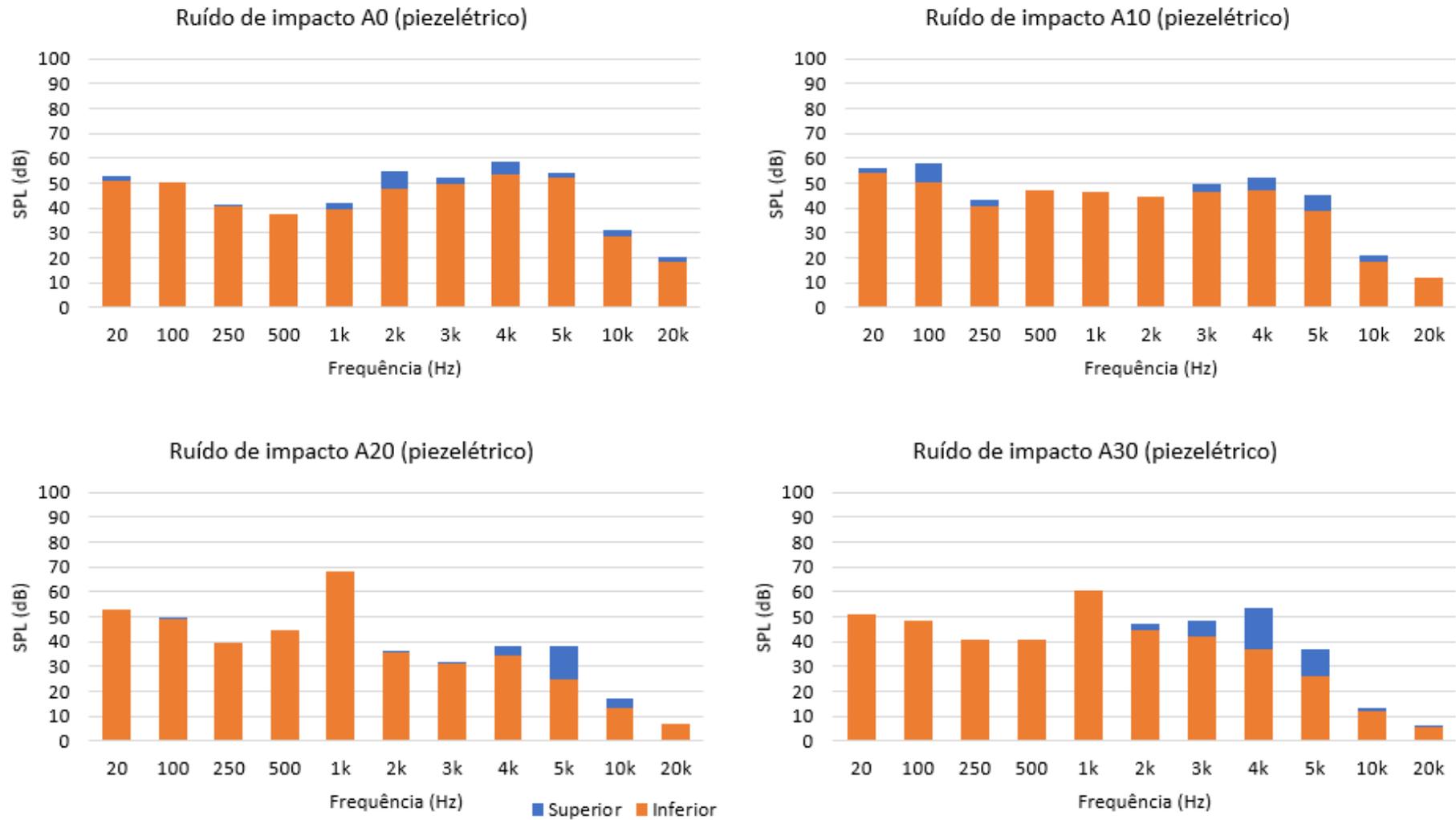


Figura 95 - Análise dos sensores piezelétricos superior e inferior no ruído de impacto

Fonte: Autoria própria

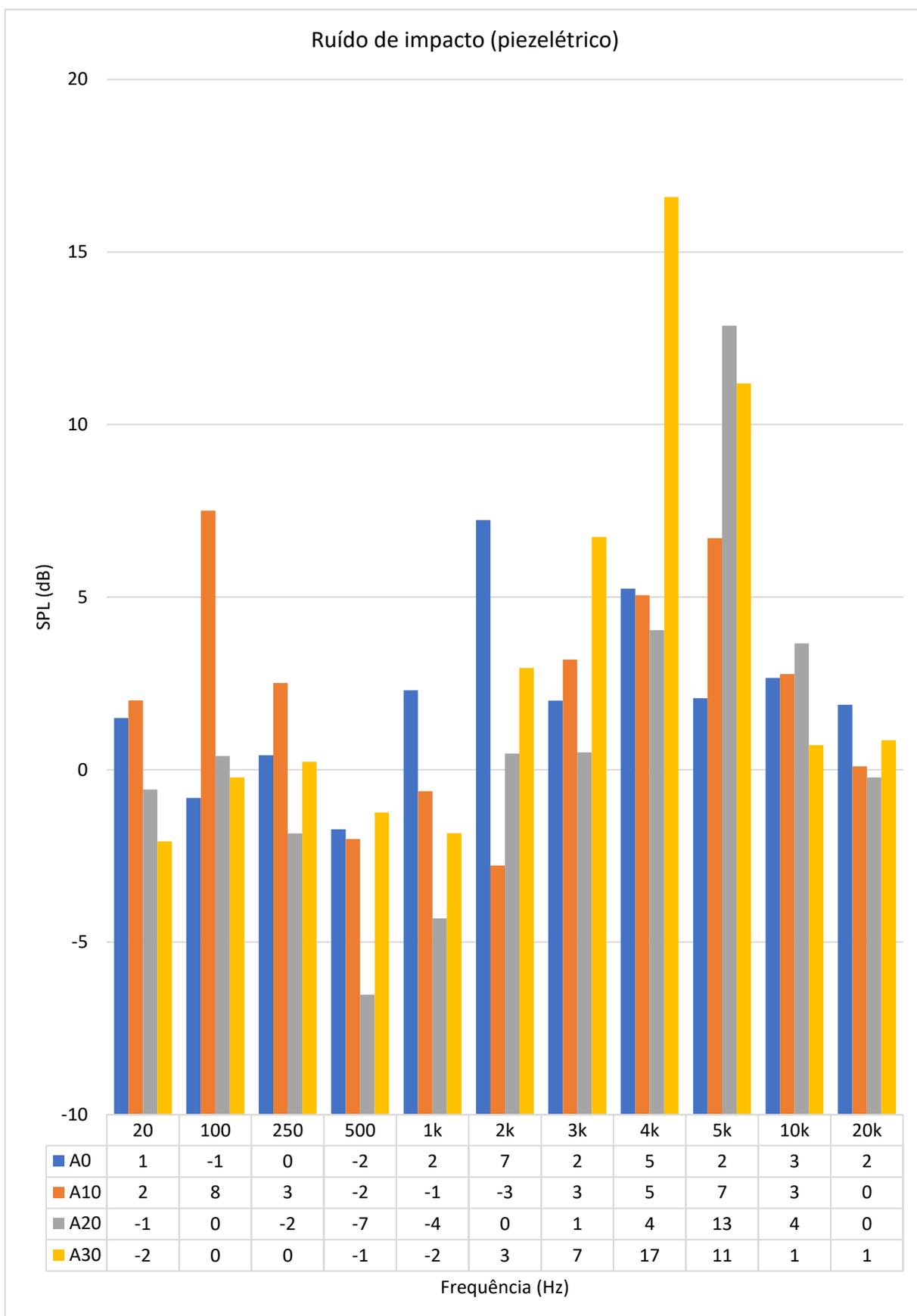


Figura 96 - Comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora no ruído de impacto nos contrapisos estudados medidos pelos sensores piezelétricos

Fonte: Autoria própria

4.6.4 Medição pelo decibelímetro

A fim de comparar os níveis de ruídos aceitáveis entre pisos de uma edificação, além das medições citadas anteriormente, também foram feitas medições em tempo real do nível de pressão sonora, através de um decibelímetro posicionado na parte inferior da câmara. A Tabela 28 contém a média de três medições que foram feitas durante os ensaios de ruído de impacto e de ruído aéreo. O decibelímetro utilizado nesses ensaios mede as faixas de frequência de 31,5 a 8 kHz.

O nível de pressão sonora do ruído branco que estava sendo emitido no alto falante da câmara acústica era de 83 dB. Já o nível de pressão sonora que o equipamento gerador de ruído de impacto emitia na parte superior da câmara acústica, dependia da dosagem de cada contrapiso, uma vez que o som emitido no contrapiso de referência era mais alto e agudo e os que possuíam o resíduo de pneu era mais abafado devido a própria composição do material adicionado. É importante ressaltar que a fonte geradora de ruído de impacto foi utilizada sempre com a mesma frequência, mesma intensidade e mesma altura de queda.

Tabela 28 - Medições nos ensaios de ruído aéreo e ruído de impacto feitas no decibelímetro na parte inferior da câmara acústica

Argamassa	Ruído aéreo superior (dB)	Ruído aéreo inferior (dB)	Ruído de impacto superior (dB)	Ruído de impacto inferior (dB)
A0	83	66	77	56
A10	83	62	70	54
A20	83	62	74	47
A30	83	61	70	49

Fonte: Autoria própria

Em relação ao ruído de impacto, com exceção do contrapiso convencional, todos os outros contrapisos estão abaixo do valor de 55 dB, o que indica que todos os tratamentos foram eficazes quanto a esse parâmetro. Sendo o contrapiso com a argamassa A20 o mais eficaz, conforme já era esperado, devido ao seu alto índice de vazios, chegando a atenuar cerca de 6 dB em relação ao contrapiso de referência.

Em relação ao ruído aéreo, observa-se que o valor medido pelo decibelímetro na parte inferior diminui à medida em que se aumenta a quantidade de resíduo de borracha na argamassa. O contrapiso A30 atenuou 4 dB a mais do que o contrapiso de referência.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio da análise estatística, considerando um nível de significância de 5%, foi possível verificar que a borracha afetou todas as propriedades estudadas nessa dissertação. As principais conclusões em relação aos ensaios mecânico e acústicos são apresentadas nos tópicos a seguir:

A massa unitária do pó de borracha é três vezes menor do que a da areia, o que exerce grande influência nas propriedades das argamassas com incorporação desse resíduo em substituição à areia. A borracha também influenciou diretamente na redução da densidade de massa no estado fresco da argamassa, tornando-a mais leve. Além disso, com o aumento do teor do resíduo, houve um aumento na retenção de água e no índice de vazios.

Através da análise das curvas *squeeze-flow*, pode-se afirmar que a argamassa para uso em contrapisos é pouco trabalhável e necessita de uma carga maior para que ocorra uma deformação na argamassa, em comparação a outros tipos de argamassas. Esse fato é confirmado pela baixa relação água/cimento que uma argamassa de contrapiso deve possuir, tendo em vista que a compactação é feita manualmente. Outro fato observado é que na argamassa com borracha há um aumento na deformação para uma mesma carga à medida em que se aumenta a quantidade de pó de borracha nas amostras.

Na análise da microestrutura das argamassas foram observadas descontinuidades na interface borracha-matriz cimentícia, indicando pouca adesão entre essas partículas e a pasta de cimento. Isso acarretou um aumento na quantidade de vazios aderidos à superfície da borracha e que, conseqüentemente, levou a uma diminuição da resistência à tração na flexão e na resistência à compressão. Nenhuma argamassa com adição de pó de borracha atingiu a resistência mínima de 8 MPa de resistência à compressão, o que evidencia que ainda devem ser estudadas soluções para melhorar a aderência da pasta cimentícia à borracha, ou a incorporação de aditivos na mistura que melhorem essa propriedade.

Em relação a resistência de aderência à tração, as argamassas A20 e A30 não apresentaram o valor mínimo exigido pela NBR 13281 (ABNT, 2005) de 0,3 MPa. Na execução desses ensaios, pode ser observado que a forma de execução deve ser reformulada, uma vez que muitos dos corpos de prova nessas duas dosagens romperam-se na própria argamassa, o que não determina a verdadeira resistência de aderência.

Na absorção de água por capilaridade, todos os tratamentos apresentaram desempenho superior a dosagem de referência, indicando que esse parâmetro foi beneficiado

com a adição de borracha, sendo que a argamassa A30 teve seu valor de coeficiente de capilaridade menor que a argamassa convencional cerca de 24 vezes.

Além das propriedades mecânicas, também foram medidas as propriedades acústicas dos contrapisos. Para isso, a elaboração da câmara acústica foi primordial na execução dos ensaios de ruído aéreo e de ruído de impacto. Muito ainda deve ser refinado e modificado para que ela funcione de maneira eficiente e sem interferências do meio externo, porém, diante das repetições e verificações do método desenvolvido, pode-se verificar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Em relação ao ruído aéreo, todos os contrapisos com adição do resíduo desempenharam melhores características de isolamento acústico, com destaque ao contrapiso A20, seguido do contrapiso A30, que melhoraram cerca de 3 dB em relação ao contrapiso de referência. Em relação ao ruído de impacto captado pelos microfones, o contrapiso convencional desempenhou melhor resultado nas frequências estudadas, seguido do contrapiso A20. Já ao ruído de impacto captado pelos sensores piezelétricos, os contrapisos com adição de borracha absorveram mais som de faixas de frequências diferentes. Nas frequências graves, o contrapiso A10 desempenhou melhor resultado. Nas frequências médias, o contrapiso A30 obteve melhor resultado. E nas frequências agudas, o contrapiso A20.

Na análise com decibelímetro em relação ao ruído de impacto, com exceção do contrapiso convencional, todos os outros contrapisos absorveram de forma mais eficaz o ruído ficando abaixo do valor de 55 dB. Sendo o contrapiso com a argamassa A20 o mais eficaz, conforme já era esperado, devido ao seu alto índice de vazios, chegando a atenuar cerca de 6 dB em relação ao contrapiso de referência.

Na análise com decibelímetro em relação ao ruído aéreo, observou-se que o valor medido pelo decibelímetro na parte inferior diminuiu à medida em que se aumentou a quantidade de resíduo de borracha na argamassa. O contrapiso A30 atenuou 4 dB a mais do que o contrapiso de referência.

O resíduo de borracha da indústria de pneus se mostrou eficiente na redução dos ruídos aéreos e de impacto para o uso em argamassas de contrapiso. Do ponto de vista acústico, a argamassa com maior potencial de isolamento acústico, em comparação com a argamassa convencional, foram as argamassas A20 e A30.

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa, ainda não é possível afirmar a viabilidade técnica do uso de resíduos de borracha de pneus inservíveis em argamassas para uso em contrapisos, uma vez que essas argamassas apresentam problemas de resistência mecânica e excessivo índice de vazios, o que compromete seu desempenho em serviço. Muito

embora os resultados acústicos tenham sido satisfatórios, as propriedades mecânicas requeridas da argamassa devem ser compatíveis com sua utilização.

A compatibilidade entre as propriedades físico-mecânicas e acústicas seria mais favorável para as argamassas com teores de substituição de até 10%, sugerindo que novos estudos devem ser feitos em dosagens menores de substituição de pó de borracha na argamassa.

Sugestões para trabalhos futuros

Em função do que foi apresentado, algumas sugestões são feitas para verificações em trabalhos futuros:

- Reformular a câmara acústica a fim de igualar a parte superior com a inferior, uma vez que a propagação do som no ensaio acústico deve ser igual em ambas as partes e assim possa ser avaliado somente o material considerado;
- Especificar uma maneira de posicionar o material estudado no interior da câmara, uma vez que essa foi a maior dificuldade encontrada na execução dos ensaios acústicos;
- Variar as alturas dos contrapisos a fim de avaliar a influência destas no isolamento acústico.
- Realizar uma análise de durabilidade em argamassas com incorporação de pó de borracha, uma vez a durabilidade é fator determinante na qualidade de um material;
- Realizar avaliações da influência de temperatura em argamassas com incorporação de pó de borracha;
- Realizar ensaios de resistência à compressão no sistema de piso;
- Testar armação nos contrapisos com incorporação de pó de borracha a fim de melhorar os pontos de baixa resistência nos cantos e em seguida verificar o quanto essa armação influencia na propagação de ruídos;
- Avaliar a real viabilidade econômica do sistema de piso com estas argamassas, em comparação aos sistemas tradicionais de mercado;
- Realizar estudos quanto à inflamabilidade e toxicidade das composições com borracha reciclada de pneus;
- Realizar os ensaios acústicos com dois decibelímetros simultâneos, um na parte superior e outro na parte inferior, a fim de comparar esses resultados;
- Diminuir a altura dos contrapisos para os ensaios de resistência de aderência à tração para que não se rompam na argamassa e sim na interface argamassa/substrato;
- Estudar o uso de adição de pó de borracha em outros tipos de argamassas de modo que a resistência mecânica requerida seja compatível com as propriedades acústicas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. C.; SILVA FILHO, L. C. P.; CALMON, J. L.; ANDRADE, M. A. S. (2008). **Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concretes**. DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, ISTANBUL – Turkey.
- ANDRIETTA, A. J. (2002). **Pneus e o Meio Ambiente: Um grande problema requer uma grande solução**.
- ANGELIN, A. F.; CECHE LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.; OSÓRIO, W. R. **The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of in environmentally friendly cement with recycled rubber**. Construction and Building Materials, v. 151, p. 534-545, 2017.
- ANGELIN, A. F.; MIRANDA JR., E. J. P.; DOS SANTOS, J. M. C.; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. (2019). **Rubberized mortar: The influence of aggregate granulometry in mechanical resistances and acoustic behavior**. Construction and Building Materials, v. 200, p. 248–254.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2019.
- _____. **Resíduos sólidos: manual de boas práticas no planejamento**. São Paulo, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 13277: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13281: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13528: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15259: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15575: **Edificações habitacionais: desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 15839: **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 15900: **Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 16541: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

AZEVEDO, A.R.G., ALEXANDRE, J., ZANELATO, E.B., MARVILA, M.T. (2017). **Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar.** Construction and Building Materials, 148, 59–368.

- BARROS, M. M. S. B. (1991). **Tecnologia de produção de contrapisos para edifícios habitacionais e comerciais**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – São Paulo – SP, Universidade de São Paulo (USP).
- BISTAFA, S. R. (2011). **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2º edição - São Paulo: Blucher.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (1998). **Pneus: áreas de operações industriais 2; gerência Setorial 2**. Brasília.
- BORGES, J., K.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; OLIVEIR, M., F. (2018). **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, págs. 501 - 508.
- BRASIL, Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009. **Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências**. Publicada no DOU Nº 188, de 01/10/2009, págs. 64-65.
- CABRAL, C., M. (2012). **Acústica industrial: aplicação da análise de vibrações e ruído à identificação de fontes de ruído em ambiente industrial**. Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia mecânica da faculdade de ciências e tecnologia da Universidade de Coimbra. Portugal.
- CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G. (2007).) **A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. Acta Scientiarum. Technology, v. 29, n. 2, p. 141-149.
- CANOVA, J., A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G.; GLEIZE, P., J., P. (2012). **Comparative analysis of the properties of composite mortar with addition of rubber powder from worn tires**. Ambiente construído – Porto Alegre. Volume 12, nº 1.
- CARASEK, H. (2010). **Argamassas**. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª. ed. vol. 2. São Paulo: IBRACON.
- CARVALHO, R., P. (2006). **Acústica arquitetônica**. Brasília: Thesaurus. 167 p.
- CASTRO, A. P. A. S., RANCURA, R. L. (2018). **Conforto ambiental: acústico e lumínico**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 176 páginas.
- CICHINELLI, G. (2009). **Construção Passo a Passo**. - São Paulo: Pini.

- CORREDOR-BEDOYA, A., C.; ZOPPI, R., A.; SERPA, A., L. (2017). **Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar - Noise insulation potential**. *Cement and Concrete Composites*. 82: 45 – 66.
- CRUZ, G., A., A.; CALHABEU, E., M.; MARTINS, C., A.; SORDI, V., L. (2002). **Utilização de resíduos de borracha de pneus como agregado em concreto de cimento Portland**. CBECIMAT (Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais) – Natal - RN.
- DI MUNDO, R.; PETRELLA, A.; NOTARNICOLA, M. (2018). **Surface and bulk hydrophobic cement composites by tyre rubber addition**. *Construction and Building Materials*. 172: 176–184.
- FARIA, J. S. (2015). **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 121p.
- FAZZAN, J. V.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. (2016). **Estudo da viabilidade de utilização do Resíduo de Borracha de Pneu em Concretos Estruturais**. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v 12, n. 6, p. 118-132.
- FIORITO, A. J. S. I. (2009). **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: Pini.
- GARCIA, S. L. G. (2002). **Taxa de armadura transversal mínima em vigas de concreto armado**. Tese de doutorado em Engenharia Civil submetida a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE). 207 p.
- GERGES, S., N., Y. (2000). **Ruído: fundamentos e controle**. NR Editora. 2ª edição. Florianópolis. Santa Catarina.
- GOMES, F. G. (1987). **Curso de Estatística Experimental**, 12ª edição.
- HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J. (2009). **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. Volume 2. 8ª edição. Editora LTC.
- HAN, Z.; CHUNSHENG, L.; KOMBE, T.; THONG-ON, N. (2008). **Crumb rubber blends in noise absorption study**. *Materials and Structures*. 41: 383 – 390.
- HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. (2014). **Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement**. *Construction and Building Materials*, Vol 73, p. 195–204.
- INMETRO (Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia). Portaria n.º 554, de 29 de outubro de 2015. **Aprovar o Regulamento Técnico da Qualidade para Reforma de Pneus**. Publicada no DOU de 03 de novembro de 2015, seção 1, páginas 20 a 21.

- LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J.A.S. (2008). **Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 2, p. 106-118.
- LING, T.C.; NOR, H.M.; LIM, S.K. (2010). **Using recycled waste tyres in concrete paving blocks**. *Waste and Resource Management*, Vol.163, p. 37 – 45.
- MISHRA, R.; JAIN, S.; PRASAD, C. D. (2015). **A review on piezoelectric material as a source of generating electricity and its possibility to fabricate devices for daily uses of army personnel**. *International Journal of Systems, Control and Communications*. Vol. 6, No. 3.
- MOHAMMED, B.S.; ANWAR HOSSAIN, K.M.; JACKSON, T.E.S.; WONG, G.; ABDULLAHI, M. (2012). **Properties of crumb rubber hollow concrete block**. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 23, p. 57–67.
- NACIF, G. L.; PANZERA, T. H.; STRECKER, K.; CHRISTOFORO, A. L.; PAINE, K. (2013). **Investigations on Cementitious Comp/osites Based on Rubber Particle Waste Additions**. *Materials Research*. 16(2): 259-268.
- PCZIECZEK, A.; EFFTING, C.; GOMES, I. R.; SCHACKOW, A.; HENNING, E. (2019) **Statistical analysis of mechanical properties of mortars with fly ash and waste tire rubber**. *IBRACON - Volume 12, Number 4*, p. 790 – 811.
- PROACUSTICA (Associação Brasileira Para a Qualidade Acústica) (2015). **Manual Proacústica de Recomendações Básicas para Contrapisos Flutuantes**. São Paulo, SP.
- SABBATINI, F. H. (1990). **Tecnologia de execução de revestimentos de argamassas**. In: *Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto*, 13. Campinas: Concrelix.
- SANTOS, D.P.; AZEVEDO, A.R.G.; HESPANHOL, R.L.; ALEXANDRE, J. (2016). **Characterization of incorporation the glass waste in adhesive mortar**, in: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, 1 ed., John Wiley & Sons Inc, USA, p. 539-545.
- SANTOS, F., A. (2013). **Avaliação de placas cimentícias com resíduo de EVA quanto ao seu nível de isolamento acústico em sistemas de pisos flutuantes**. *Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa*.
- SEGRE, N.; JOEKES, I. (2000). **Use of tire rubber particles as addition to cement paste**. *Cement and Concrete Research* 30, p. 1421 – 1425.
- SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. (2002). **Surface characterization of Recycled Tire Rubber to be used in cement paste**. *J. Colloid Interface Sci*. Vol. 248, p. 521 - 523.

SINDIPNEUS (Sindicato Das Empresas De Revenda E Prestação De Serviços De Reforma De Pneus E Similares Do Estado De Minas Gerais) (2012). **Manual TWI - informações técnicas sobre pneus.**

SON, K. S.; HAJIRASOULIHA, I.; PILAKOUTAS, K. (2011). **Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns.** Construction and Building Materials, v. 25, p. 218-226.

THOMAS, B.S.; GUPTA, R.C. (2016). **Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber.** Journal of Cleaner Production, p. 86 – 92.

TIE, T. S.; MO, K. H.; PUTRA, A.; LOO, S. C.; ALENGARAM, J.; LING, T. C. (2020). **Sound absorption performance of modified concrete: A review.** Journal of Building Engineering, Vol. 30.

TIPLER, A.P.; MOSCA, G. (2006). **Física.** 5.ed. Rio de Janeiro: LTC. cap. 31, v.2.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P. de; OLIVEIRA, M. F. de (2017). **Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.17, n. 3, p. 295-306.

VERZEGNASSI, E.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G.; JACINTHO, A. E. P. G. A. (2011). **Concreto convencional com adição de borracha reciclada de pneus: estudo das propriedades mecânicas.** Estudos Tecnológicos - Volume. 7, nº 2.

WONGSA, A.; SATA, V.; NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. (2018). **Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymers incorporating crumb rubber.** Journal of Cleaner Production, v. 195, p.1069-1080.

ANEXO I – ANÁLISE ESTATÍSTICA

São necessários que os dados dos ensaios que apresentam mais de uma repetição sejam tratados através de análise estatística antes de serem comparados. Por esse motivo, na avaliação dos parâmetros obtidos foi utilizada a análise de variância (ANOVA) do delineamento inteiramente casualizado (DIC) ($p \leq 0,05$), com o intuito de verificar a existência de significância estatística entre os tratamentos realizados. O delineamento inteiramente casualizado (DIC) leva em consideração os princípios da repetição e da casualização, e é considerado o mais simples entre os delineamentos estatísticos. São realizados em situações de homogeneidade, por isso são muito usados em ensaios de engenharia. Apresenta como vantagem o fato de poder ser utilizado com qualquer número de tratamentos e repetições quando comparado a outros delineamentos (GOMES, 1987).

É possível realizar a análise de variância utilizando como base a Tabela 29. Alguns parâmetros são necessários para realizar essa análise. Esses parâmetros são a soma de quadrado do tratamento (SQ_{TRAT}), a soma de quadrado total (SQ_{TOT}) e a soma de quadrado do resíduo (SQ_{RES}) obtidos pelas expressões 26, 27 e 28, respectivamente.

Tabela 29 - Tabela ANOVA para DIC

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	$(a - 1)$	SQ_{TRAT}	$\frac{SQ_{TRAT}}{a - 1}$	$\frac{QM_{TRAT}}{QM_{RES}}$	F Tabelado (Tabela 48)	Significativo ou não
Resíduo	$a(b - 1)$	SQ_{RES}	$\frac{QM_{RES}}{a(b - 1)}$			
Total	$(ab - 1)$	SQ_{TOT}				

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrados médios; F = parâmetro calculado.

Fonte: Autoria própria

$$SQ_{TRAT} = \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{b} - \frac{(\sum_{i=1, j=1}^{a,b} y_{ij})^2}{ab} \quad \text{Equação 26}$$

$$SQ_{TOT} = \sum_{i=1, i=j}^{a,b} y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1, j=1}^{a,b} y_{ij})^2}{ab} \quad \text{Equação 27}$$

$$SQ_{RES} = SQ_{TOT} - SQ_{TRAT} \quad \text{Equação 28}$$

Obtido o parâmetro F, é possível compará-lo com o valor de F tabelado. A regra decisória para o teste F é se o valor F for maior que o valor F_{tabelado} , então rejeita-se H_0 , e conclui-se que os tratamentos têm efeito diferenciado ao nível de significância em que o teste foi realizado. Caso contrário, ou seja, caso F seja menor que o valor F_{tabelado} , então aceita-se a hipótese H_0 , e todos os tratamentos realizados são estatisticamente iguais. Sempre que a hipótese H_0 for rejeitada pelo teste F é necessário realizar o teste de contraste de médias proposto por Tukey. O teste baseia-se no cálculo da diferença mínima significativa (DMS) obtida pela expressão:

$$DMS = q_{tab} \sqrt{\frac{QM_{RES}}{b}} \quad \text{Equação 29}$$

Com:

q_{tab} = amplitude total estudentizada usada por Tukey ($p \leq 0,05$) apresentada no Anexo II, Tabela 49.

Para apresentar os resultados deve ser construída uma tabela com os tratamentos em ordem. Na frente dos valores obtidos colocam-se letras seguindo a ordem do alfabeto (a, b, c, ...) utilizando a seguinte regra: médias com letras distintas apresentam diferença estatística, enquanto médias com letras iguais apresentam médias estatisticamente iguais.

A seguir estão expostas as análises estatísticas para os ensaios aos quais houve repetição.

A Tabela 30 apresenta a ANOVA para a retenção de água, enquanto a Tabela 31 apresenta o teste de Tukey. Observa-se que as argamassas A10 e A20 são as que têm o melhor desempenho em relação à argamassa de referência e que houve uma queda neste parâmetro para a argamassa A30.

Tabela 30 - ANOVA para DIC da retenção de água ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	3	0,296189	0,09872966	68,56836294	3,490295	Significativo
Resíduo	12	0,017278	0,00143987			
Total	15	0,313467				

Fonte: Autoria própria

Tabela 31 - Teste de Tukey para contraste de médias da retenção de água ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (%)	Tukey
A0	99,20	a
A10	99,44	b
A20	99,28	b
A30	99,06	c

Fonte: Autoria própria

A Tabela 32 apresenta a ANOVA para a resistência à compressão, enquanto a Tabela 33 apresenta o teste de Tukey. Observa-se que há uma queda esperada e comprovada estatisticamente na resistência das argamassas contendo pó de borracha em relação à argamassa de referência. Porém não há variação estatística entre os valores desse parâmetro para as argamassas A20 e A30.

Tabela 32 - ANOVA para DIC da resistência à compressão ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	F _{tab}	Teste
Tratamentos	3	1057,672639	352,55754643	518,6336598	3,10	Significativo
Resíduo	20	13,595629	0,67978146			
Total	23	1071,268268				

Fonte: Autoria própria

Tabela 33 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (MPa)	Tukey
A0	17,64	a
A10	6,78	b
A20	1,64	c
A30	1,13	c

Fonte: Autoria própria

A Tabela 34 apresenta a ANOVA para resistência à tração na flexão, enquanto a Tabela 35 apresenta o teste de Tukey. Observa-se que os valores da resistência à tração na flexão foram, em média, 2,5 vezes menores.

Tabela 34 - ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	F _{tab}	Teste
Tratamentos	3	44,703531	14,90117709	120,615046	3,10	Significativo
Resíduo	20	2,470865	0,12354327			
Total	23	47,174397				

Fonte: Autoria própria

Tabela 35 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (MPa)	Tukey
A0	4,17	a
A10	2,45	b
A20	1,06	c
A30	0,70	c

Fonte: Autoria própria

Conforme verifica-se pela ANOVA das Tabela 36 e Tabela 38, a incorporação de pó de borracha nas argamassas é estaticamente significativo para os parâmetros de absorção de água por imersão e índice de vazios, respectivamente. Além disso, através do teste de Tukey nas

Tabela 37 e Tabela 39 é possível notar que a argamassa A30 foi a que apresentou o maior índice de vazios, valendo 39,32% e, conseqüentemente, a maior absorção de água, ambas possuindo diferenças estatísticas para todos os tratamentos estudados.

Tabela 36 - ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	F _{tab}	Teste
Tratamentos	3	1072,105877	357,36862582	2373,009763	3,10	Significativo
Resíduo	20	3,011944	0,15059720			
Total	23	1075,117821				

Fonte: Autoria própria

Tabela 37 - Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (%)	Tukey
A0	12,86	a
A10	18,25	b
A20	24,17	c
A30	30,79	d

Fonte: Autoria própria

Tabela 38 - ANOVA para DIC do índice de vazios ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	3	712,423498	237,47449918	1645,461415	3,10	Significativo
Resíduo	20	2,886418	0,14432092			
Total	23	715,309916				

Fonte: Autoria própria

Tabela 39 - Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (%)	Tukey
A0	24,96	a
A10	29,85	b
A20	35,39	c
A30	39,32	d

Fonte: Autoria própria

A Tabela 40 apresenta a ANOVA para massa específica real, enquanto a Tabela 41 apresenta o teste de Tukey. Pode ser observado que a adição de pó borracha nas argamassas tem efeito significativo nesse parâmetro para todos os tratamentos estudados.

Tabela 40 - ANOVA para DIC da massa específica real ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	3	0,719975	0,23999177	1246,613466	3,10	Significativo
Resíduo	20	0,003850	0,00019251			
Total	23	0,723826				

Fonte: Autoria própria

Tabela 41 - Teste de Tukey para contraste de médias da massa específica real ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média	Tukey
A0	2,59	a
A10	2,33	b
A20	2,27	c
A30	2,10	d

Fonte: Autoria própria

A Tabela 42 apresenta a ANOVA para a densidade de massa aparente no estado endurecido, enquanto a Tabela 43 apresenta o teste de Tukey. Pode ser observado que a adição de pó borracha nas argamassas tem efeito significativo nesse parâmetro, possuindo diferença estatística em todos os tratamentos.

Tabela 42 - ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	3	2,030753	0,67691767	1844,415253	3,10	Significativo
Resíduo	20	0,007340	0,00036701			
Total	23	2,038093				

Fonte: Autoria própria

Tabela 43 - Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido
($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média (g/cm ³)	Tukey
A0	2,05	a
A10	1,80	b
A20	1,44	c
A30	1,31	d

Fonte: Autoria própria

A Tabela 44 apresenta ANOVA para a capilaridade aos 10 minutos, enquanto a Tabela 45 apresenta o teste de Tukey. Observa-se que há diferença estatística entre três delas, sendo mais significativo para a argamassa A30, argamassa em que foi obtido o melhor resultado para esse parâmetro.

Tabela 44 - ANOVA para DIC da capilaridade aos 10 minutos ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	F _{tab}	Teste
Tratamentos	3	0,088798	0,02959920	928,60226	3,10	Significativo
Resíduo	20	0,000637	0,00003187			
Total	23	0,089435				

Fonte: Autoria própria

Tabela 45 - Teste de Tukey para contraste de médias da capilaridade aos 10 minutos ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média	Tukey
A0	0,18	a
A10	0,05	b
A20	0,04	b
A30	0,03	c

Fonte: Autoria própria

A Tabela 46 apresenta ANOVA para a capilaridade aos 90 minutos, enquanto a Tabela 47 apresenta o teste de Tukey. O pó de borracha afeta significativamente a argamassa

estudada, entretanto pode ser observado que não há diferença estatística na porcentagem de pó de borracha incorporada.

Tabela 46 - ANOVA para DIC da capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$)

FV	GL	SQ	QM	F	Ftab	Teste
Tratamentos	3	0,294641	0,09821361	123,4905861	3,10	Significativo
Resíduo	20	0,015906	0,00079531			
Total	23	0,310547				

Fonte: Autoria própria

Tabela 47 - Teste de Tukey para contraste de médias da capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$)

Argamassa	Média	Tukey
A0	0,30	a
A10	0,05	b
A20	0,05	b
A30	0,02	b

Fonte: Autoria própria

ANEXO II – TABELAS PARA ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Tabela 48 - Limites unilaterais de F ao nível de 95% de confiança

$n_2 \backslash n_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,4	245,0	245,9	246,0	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,40	19,41	19,42	19,42	19,43	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,72	8,71	8,70	8,69	8,66	8,64	8,62	8,62	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,93	5,91	5,89	5,87	5,86	5,84	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,66	4,64	4,62	4,60	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,98	3,96	3,94	3,92	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,55	3,52	3,51	3,49	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,25	3,23	3,22	3,20	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,04	3,02	3,01	2,98	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,88	2,86	2,85	2,82	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,76	2,74	2,72	2,70	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,66	2,64	2,62	2,60	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,57	2,55	2,53	2,51	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,56	2,53	2,50	2,48	2,46	2,44	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,45	2,43	2,40	2,39	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,45	2,42	2,39	2,37	2,35	2,33	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33	2,31	2,29	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,31	2,29	2,27	2,25	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,23	2,21	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,23	2,20	2,18	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,20	2,18	2,15	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,20	2,18	2,15	2,13	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,24	2,20	2,17	2,14	2,13	2,10	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,22	2,18	2,15	2,13	2,11	2,09	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09	2,06	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,12	2,10	2,07	2,05	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,16	2,13	2,10	2,08	2,06	2,03	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06	2,04	2,02	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,07	2,05	2,03	2,00	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,06	2,04	2,01	1,99	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,97	1,95	1,92	1,90	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,89	1,86	1,84	1,81	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,86	1,83	1,80	1,77	1,75	1,73	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,72	1,69	1,67	1,64	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Legenda: n_1 = número de graus de liberdade do numerador e n_2 = número de graus de liberdade do denominador.

Fonte: (Gomes,1987)

Tabela 49 - Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança.

n_2/n_1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	17,97	26,98	32,82	37,08	40,41	43,12	45,40	47,36	49,07	50,59	51,96	53,20	54,33	55,36	56,32	57,22	58,04	58,83	59,56
2	6,09	8,33	9,80	10,88	11,74	12,44	13,03	13,54	13,99	14,39	14,75	15,08	15,38	16,65	15,91	16,14	16,37	16,57	16,77
3	4,50	5,91	6,83	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,72	9,95	10,15	10,35	10,53	10,69	10,84	10,98	11,11	11,24
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,03	8,21	8,37	8,53	8,66	8,79	8,91	9,03	9,13	9,23
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	7,00	7,17	7,32	7,47	7,60	7,72	7,83	7,93	8,03	8,12	8,21
6	3,46	4,34	4,90	5,31	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	6,65	6,79	6,92	7,03	7,14	7,24	7,34	7,43	7,51	7,59
7	3,34	4,17	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,30	6,43	6,55	6,66	6,76	6,85	6,94	7,02	7,10	7,17
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,05	6,18	6,29	6,39	6,48	6,57	6,65	6,73	6,80	6,87
9	3,20	3,95	4,42	4,76	5,02	5,24	5,43	5,60	5,74	5,87	5,98	6,09	6,19	6,28	6,36	6,44	6,51	6,58	6,64
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,31	5,46	5,60	5,72	5,83	5,94	6,03	6,11	6,19	6,27	6,34	6,41	6,47
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,61	5,71	5,81	5,90	5,98	6,06	6,13	6,20	6,27	6,33
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,40	5,51	5,62	5,71	5,80	5,88	5,95	6,02	6,09	6,15	6,21
13	3,06	3,74	4,15	4,45	4,69	4,89	5,05	5,19	5,32	5,43	5,53	5,63	5,71	5,79	5,86	5,93	6,00	6,06	6,11
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,55	5,64	5,71	5,79	5,85	5,92	5,97	6,03
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,60	4,78	4,94	5,08	5,20	5,31	5,40	5,49	5,57	5,65	5,72	5,79	5,85	5,90	5,96
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,26	5,35	5,44	5,52	5,59	5,66	5,73	5,79	5,84	5,90
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,71	4,86	4,99	5,11	5,21	5,31	5,39	5,47	5,54	5,61	5,68	5,73	5,79	5,84
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,50	4,67	4,82	4,96	5,07	5,17	5,27	5,35	5,43	5,50	5,57	5,63	5,69	5,74	5,79
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,14	5,23	5,32	5,39	5,46	5,53	5,59	5,65	5,70	5,75
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,11	5,20	5,28	5,36	5,43	5,49	5,55	5,61	5,66	5,71
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,01	5,10	5,18	5,25	5,32	5,38	5,44	5,49	5,55	5,59
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	4,92	5,00	5,08	5,15	5,21	5,27	5,33	5,38	5,43	5,48
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,64	4,74	4,82	4,90	4,98	5,04	5,11	5,16	5,22	5,27	5,31	5,36
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	4,73	4,81	4,88	4,94	5,00	5,06	5,11	5,15	5,20	5,24
120	2,80	3,36	3,69	3,92	4,10	4,24	4,36	4,47	4,56	4,64	4,71	4,78	4,84	4,90	4,95	5,00	5,04	5,09	5,13
∞	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47	4,55	4,62	4,69	4,74	4,80	4,85	4,89	4,93	4,97	5,01

Legenda: n_1 = número de tratamentos e n_2 = número de graus de liberdade do resíduo.

Fonte: (Gomes,1987)