



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

ADRIANA GOMES

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE
BORRACHA

STUDY OF THE MORTARS BEHAVIOR WITH RUBBER WASTE

LIMEIRA
2020

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE
BORRACHA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Tecnologia da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção do título de
Mestra em Tecnologia, na área de
Ciências dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosa Cristina Cecche Lintz

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELA ALUNA ADRIANA
GOMES E ORIENTADA PELA PROFA.
DRA. ROSA CRISTINA CECHE LINTZ.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

G633e Gomes, Adriana, 1975-
Estudo do comportamento de argamassas com resíduos de borracha /
Adriana Gomes. – Limeira, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Tecnologia.

1. Argamassa. 2. Sustentabilidade. 3. Pneus - Reaproveitamento
. 4. Isolamento acústico. 5. Isolamento térmico. I. Lintz, Rosa Cristina Cecche,
1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III.
Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of the mortars behavior with rubber waste

Palavras-chave em inglês:

Mortar

Sustainability

Tires - Recycling

Soundproofing

Insulation (Heat)

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Mestra em Tecnologia

Banca examinadora:

Rosa Cristina Cecche Lintz [Orientador]

Luísa Andréia Gachet

Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Data de defesa: 19-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-1673-7210>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8059803570494420>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestra em Tecnologia na área de concentração de Ciências dos Materiais, a que submeteu a aluna Adriana Gomes, em 19 de Fevereiro de 2020 na Faculdade de Tecnologia - FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof.ª Dr.ª Rosa Cristina Cecche Lintz

Presidente da Comissão Julgadora

Prof.ª Dr.ª Luísa Andréia Gachet

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Prof.ª Dr.ª Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da FT.

Dedico este trabalho aos meus familiares
e amigos que me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido e me dado forças nos momentos de fraqueza, ânimo nos momentos difíceis e serenidade nos momentos de angústia.

Aos meus amigos e familiares por todo amor, carinho e apoio emocional, sem vocês essa jornada de trabalhos e estudos seria impossível.

À Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) pela oportunidade e suporte técnico para a realização desta pesquisa de mestrado.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Rosa Cristina Cecche Lintz e à Prof.^a Dr.^a Luísa Andréia Gachet pelos conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da FT Reginaldo Ferreira, Emerson Verzegnassi e Diego Leandro Thomaz por toda orientação e amizade ao longo destes anos e aos bolsistas, pelo apoio e suporte técnico.

Ao Instituto de Geociências (IG/UNICAMP) e à técnica do Laboratório de Microscopia, Érica Martini Tonetto, pelo auxílio na produção e análise de microscopia das amostras das argamassas.

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM/UNICAMP), ao Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos pelos esclarecimentos sobre as propriedades acústicas estudadas nesta pesquisa.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), por intermédio do técnico Paulo G. K. Nunes, pelo auxílio na realização do ensaio ultrassônico.

À LIMERCAP Pneus pelo fornecimento dos resíduos de borracha utilizados nesta pesquisa.

À Universidade Federal de Itajubá (IEM/UNIFEI), por intermédio do Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva e do técnico Bruno de Campos pelo auxílio quanto à determinação da condutividade térmica das placas de argamassa estudadas nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Existem diversas pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de novos produtos, novas tecnologias e novos usos para materiais já existentes e que possuem grande potencial de reutilização, podendo entrar novamente na cadeia produtiva. Os pneus inservíveis causam grande impacto negativo tanto na área de saúde como na ambiental. Minimizar estes impactos, buscando alternativas como a utilização desse material em novos produtos com diferentes usos, se torna prioridade. Este trabalho apresenta um estudo experimental utilizando níveis crescentes de substituição de agregados miúdos por resíduos de borracha de pneus em argamassas e sua influência nas propriedades mecânicas, acústicas e térmicas. Foram estudadas argamassas contendo 5%, 10% 15% e 20% de resíduos de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo natural. Os ensaios realizados foram: caracterização física dos agregados componentes das argamassas, ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas, como índice de consistência, retenção de água, densidade de massa, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, coeficiente de capilaridade, resistência potencial da aderência à tração. Além destes ensaios também foi verificado o desempenho acústico e térmico das argamassas e analisada sua microestrutura. Pode-se constatar que houve melhora das propriedades acústicas e térmicas com teores crescentes de borracha nas misturas. E, para os traços estudados é possível afirmar a viabilidade técnica do uso de resíduos de borracha de pneus inservíveis em argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes.

Palavras-Chave: materiais alternativos, sustentabilidade, borracha de pneus, desempenho acústico, desempenho térmico.

ABSTRACT

There are a lot of research related to the development of new products, new technologies and new uses for existing materials that have great potential for reuse, and can enter the production chain again. Waste tires have a major negative impact on both health and the environment. Minimizing these impacts, seeking alternatives such as the use of this material in new products with different uses, becomes a priority. This work presents an experimental study using increasing levels of substitution of small aggregates by rubber waste tires in mortars and their influence on mechanical, acoustic and thermal properties. Mortars containing 5%, 10% 15% and 20% tire rubber residues were studied to replace the natural fine aggregate. The tests performed were: physical characterization of the mortar component aggregates, tests in the fresh and hardened state of the mortars, such as consistency index, water retention, mass density, compressive strength, tensile strength in flexion, modulus of elasticity, coefficient capillarity, potential tensile bond strength. In addition to these tests, the acoustic and thermal performance of the mortars was also checked and their microstructure was analyzed. It can be seen that there was an improvement in the acoustic and thermal properties with increasing levels of rubber in the mixtures. And, for the studied strokes, it is possible to affirm the technical viability of using rubber waste from waste tires in mortars for laying and covering ceilings and walls.

Keywords: alternative materials, sustainability, rubber tires, acoustic performance, thermal performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pneu desenvolvido por John Boyd Dunlop.....	20
Figura 2: Estrutura de um pneu para veículo de passageiros.	21
Figura 3: Principais tecnologias de destinação dos pneus inservíveis.	23
Figura 4: Tipos de ruptura.	37
Figura 5: Fases do concreto a olho nu.	40
Figura 6: Fases do concreto a 100 µm.....	40
Figura 7: Representação esquemática da zona de transição.....	41
Figura 8: Representação das frequências.....	43
Figura 9: Pavilhão auditivo.	45
Figura 10: Níveis de ruído e seus efeitos aos ouvidos humanos.	46
Figura 11: Representação dos ruídos aéreos.....	47
Figura 12: Representação dos ruídos de impacto.....	47
Figura 13: Comportamento da onda sonora diante de uma barreira.	48
Figura 14: Processo de raspagem para recauchutagem de pneus.	56
Figura 15: Aspecto visual do resíduo.	57
Figura 16: Aspecto visual do resíduo.	57
Figura 17: Ensaios realizados para a caracterização física dos materiais.	58
Figura 18: Ensaios realizados no estado fresco e endurecido das argamassas.	63
Figura 19: Equipamento para ensaio de Tração na Flexão.	68
Figura 20: Ensaio de Tração na Flexão.....	68
Figura 21: Equipamento para ensaio de compressão.	69
Figura 22: Ensaio de Compressão.	69
Figura 23: Ensaio de Absorção por capilaridade.	70
Figura 24: Corpos de provas após ensaio de capilaridade.	70
Figura 25: Moldagem do substrato padrão em mesa vibratória.	72
Figura 26: Substrato padrão após cura de 28 dias.....	73
Figura 27: Placa com o gabarito gabarito para moldagem das argamassas.....	74
Figura 28: Realização dos entalhes nas argamassas após cura de 28 dias.....	74
Figura 29: Preparação dos corpos de provas - Colagem das pastilhas.	75
Figura 30: Execução do ensaio de aderência à tração.	75
Figura 31: Metalizadora.....	76
Figura 32: Microscópio eletrônico de varredura.	76

Figura 33: Equipamento de ultrassom utilizado nos ensaios para determinação da atenuação acústica e módulo de elasticidade dinâmico.....	77
Figura 34: Realização do ensaio de ultrassom.....	77
Figura 35: Forma para moldagem das placas.....	80
Figura 36: Placas para ensaio térmico.....	80
Figura 37: Determinação da espessura das placas para avaliação da condutividade térmica.....	81
Figura 38: Montagem das placas para o ensaio de condutividade térmica.....	82
Figura 39: Bancada experimental da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).....	83
Figura 40: Curva granulométrica da areia natural quartzosa.....	85
Figura 41: Curva granulométrica da borracha.....	86
Figura 42: Variação da densidade de massa no estado fresco.....	88
Figura 43: Variação do teor de ar incorporado.....	89
Figura 44: Variação da retenção de água.....	89
Figura 45: Variação da densidade de massa no estado endurecido.....	91
Figura 46: Variação da absorção por capilaridade.....	92
Figura 47: Microscopia da argamassa de referência CP00 - 500µm.....	93
Figura 48: Microscopia da argamassa de referência CP00 - 200µm.....	93
Figura 49: Microscopia da argamassa com 5% de resíduos de borracha CP05 - 100µm.....	94
Figura 50: Microscopia da argamassa com 5% de resíduos de borracha CP05 - 200µm.....	94
Figura 51: Microscopia da argamassa com 10% de resíduos de borracha CP10 - 500µm.....	95
Figura 52: Microscopia da argamassa com 10% de resíduos de borracha CP10 - 100µm.....	95
Figura 53: Microscopia da argamassa com 15% de resíduos de borracha CP15 - 200µm.....	96
Figura 54: Microscopia da argamassa com 15% de resíduos de borracha CP15 - 100µm.....	96
Figura 55: Microscopia da argamassa com 20% de resíduos de borracha CP20 - 500µm.....	97
Figura 56: Microscopia da argamassa com 20% de resíduos de borracha CP20 - 100µm.....	97

Figura 57: Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.	99
Figura 58: Resultados do ensaio de resistência à compressão.	100
Figura 59: Resistência potencial de aderência à tração.....	101
Figura 60: Ruptura dos corpos de provas CP10	102
Figura 61: Ruptura dos corpos de provas CP20	102
Figura 62: Variação da atenuação acústica em relação à densidade de massa.	107
Figura 63: Variação da atenuação acústica em relação ao teor de ar incorporado.	108
Figura 64: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade e resistência à compressão.....	109
Figura 65: Resultados de módulo de elasticidade obtidos por outros autores comparados com este.	110
Figura 66: Correlação entre os resultados de condutividade térmica e densidade de massa.	111
Figura 67: Resultados obtidos por outros autores frente aos obtidos neste trabalho.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Espessuras das argamassas para tetos e paredes.	28
Tabela 2: Classificação pela retenção de água.	30
Tabela 3: Densidade de massa no estado fresco.	31
Tabela 4: Densidade de massa no estado endurecido.	31
Tabela 5: Classificação segundo o coeficiente de capilaridade.	33
Tabela 6: Classificação segundo a resistência à compressão.	34
Tabela 7: Classificação segundo a resistência à tração na flexão.	35
Tabela 8: Classificação segundo a resistência potencial de aderência à tração.	37
Tabela 9: Condutividade térmica de alguns componentes construtivos.	53
Tabela 10: Características mecânicas do Cimento Portland CPV.	55
Tabela 11: Composição das argamassas.	64
Tabela 12: Características físicas e mecânicas do CPV.	84
Tabela 13: Características físicas da areia.	84
Tabela 14: Composição granulométrica da areia natural quartzosa.	85
Tabela 15: Características físicas do resíduo de borracha.	85
Tabela 16: Composição granulométrica do resíduo de borracha.	86
Tabela 17: Densidade de massa aparente no estado endurecido.	90
Tabela 18: Poder e tamanho amostral - Resistência à compressão.	103
Tabela 19: Poder e tamanho amostral - Densidade de massa.	103
Tabela 20: Efeito - Resistência à compressão.	104
Tabela 21: Efeito - Densidade de massa.	104
Tabela 22: Estatística F e P-valor - Resistência à compressão.	104
Tabela 23: Estatística F e P-valor - Densidade de massa.	104
Tabela 24: Comparações múltiplas - Resistência à compressão.	105
Tabela 25: Comparações múltiplas - Densidade de massa.	105
Tabela 26: Agrupamento dos resultados - Resistência à compressão.	106
Tabela 27: Agrupamento dos resultados - Densidade de massa.	106
Tabela 28: Resultados das propriedades acústicas estudadas por diversos autores	108

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	PNEU: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	19
3.2	COMPOSIÇÃO DOS PNEUS	20
3.3	O PNEU NO BRASIL	22
3.4	O USO DA BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS COMO AGREGADO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	25
3.5	ARGAMASSAS	28
3.6	REQUISITOS PARA ARGAMASSAS PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS	29
3.6.1	Trabalhabilidade	29
3.6.2	Retenção de água	30
3.6.3	Densidade de massa ou massa específica	30
3.6.4	Estanqueidade.....	32
3.6.5	Resistência mecânica das argamassas.....	34
3.6.6	Aderência	36
3.6.7	Ensaio de resistência potencial de aderência à tração.....	37
3.7	MICROESTRUTURA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	39
3.8	CONFORTO ACÚSTICO NAS EDIFICAÇÕES	42
3.8.1	O som	42
3.8.2	O ruído.....	44
3.8.3	Os efeitos do ruído à saúde.....	45
3.9	CLASSIFICAÇÃO DOS RUÍDOS QUANTO SUA TRANSMISSÃO.....	46
3.9.1	Ruídos aéreos	46
3.9.2	Ruídos de impacto.....	47
3.10	COMPORTAMENTO DAS ONDAS SONORAS	48
3.10.1	As ondas sonoras em estruturas de concreto	49
3.11	CONFORTO TÉRMICO NAS EDIFICAÇÕES.....	52
4	SELEÇÃO DOS MATERIAIS E METODOLOGIA UTILIZADA	55

4.1	MATERIAIS	55
4.1.1	Cimento Portland	55
4.1.2	Agregado Miúdo	56
4.1.3	Resíduo de Borracha.....	56
4.1.4	Água	57
4.2	METODOLOGIA UTILIZADA	58
4.2.1	Caracterização física dos materiais.....	58
4.2.1.1	Massa Específica e Massa Específica Aparente da Areia.....	58
4.2.1.2	Determinação da Absorção da Areia.....	60
4.2.1.3	Granulometria da Areia.....	60
4.2.1.4	Granulometria do resíduo de borracha	60
4.2.1.5	Massa unitária e volume de vazios do agregado miúdo e do resíduo de borracha.....	61
4.2.1.6	Massa específica do resíduo de borracha	61
4.3	PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	63
4.3.1	Composição das Argamassas	64
4.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	65
4.4.1	Determinação do Índice de Consistência	65
4.4.2	Determinação da Densidade e do Teor de Ar Incorporado	65
4.4.3	Determinação da Retenção de Água.....	66
4.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	68
4.5.1	Resistência à tração na flexão.....	68
4.5.2	Resistência à compressão axial	69
4.5.3	Densidade de massa no estado endurecido.....	70
4.5.4	Absorção de água por capilaridade	70
4.5.5	Determinação da resistência potencial da aderência à tração	72
4.5.5.1	Elaboração do substrato padrão.....	72
4.5.5.2	Ensaio para determinação da resistência potencial de aderência à tração	73
4.6	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	75
4.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	76
4.8	ENSAIO DE ULTRASSOM.....	77
4.9	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	79
4.10	ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	80

5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS.....	84
5.1.1	Cimento Portland CPV.....	84
5.1.2	Agregado miúdo	84
5.1.3	Resíduos de borracha	85
5.2	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	87
5.2.1	Densidade de Massa no Estado Fresco	87
5.2.2	Teor de Ar Incorporado.....	88
5.2.3	Retenção de Água	89
5.3	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	90
5.3.1	Densidade de Massa no Estado Endurecido	90
5.3.2	Absorção de água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade.....	92
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	93
5.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	99
5.5.1	Ensaio para a determinação da resistência à tração na flexão	99
5.5.2	Ensaio para a determinação da resistência à compressão	100
5.5.3	Ensaio de Resistência Potencial de Aderência à Tração	101
5.5.4	Análise de variância ANOVA	103
6	ENSAIOS ESPECIAIS	107
6.1	DESEMPENHO ACÚSTICO DAS ARGAMASSAS	107
6.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	109
6.3	ENSAIO PELO MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA PARA A AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	111
7	CONCLUSÕES.....	113
8	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	114
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento desenfreado dos centros urbanos nas últimas décadas tem agravado os problemas relacionados ao acúmulo de resíduos sólidos em locais inapropriados.

Os pneus inservíveis são considerados um problema, tanto na área da saúde por servirem de criadouro de vários tipos de vetores (PCZIECZEK et al., 2019; CINTRA et al., 2014), como na área ambiental por se tratar de produtos que, ao serem descartados em locais inapropriados, são de lenta decomposição e se incinerados poluem o meio ambiente devido às suas emissões altamente tóxicas (YANG et al., 2019; WONGSA et al., 2018).

Segundo Karakurt (2015) são produzidos em todo o mundo, por ano, mais de 1,5 bilhão de pneus, sendo necessário o desenvolvimento de um sistema de manejo eficiente ao se tratar do ciclo de vida desses produtos.

O setor industrial está investindo em técnicas inovadoras no setor de reciclagem (BOUKOUR e BENMALEK, 2016) desenvolvendo novos produtos, novas tecnologias e novos usos para materiais já existentes, que após cumprirem sua vida útil, são descartados muitas vezes em locais inapropriados. Esses materiais possuem grande potencial de reciclagem e possivelmente podem ser inseridos na cadeia produtiva adotando novas aplicações em diferentes produtos.

A borracha vulcanizada utilizada na indústria de pneus possui excelentes características físicas e mecânicas. Por se tratar de um material muito versátil, pode ser empregada na construção civil com diversas finalidades apresentando bons resultados como isolante térmico ou acústico e com boa capacidade de absorver impactos (SI et al., 2018; SILVA et al., 2018; MEDINA et al., 2017).

A incorporação de resíduos de borracha de pneus, provenientes da indústria de recauchutagem, tem sido empregados em concretos (GESOGLU et al. 2016; YOUSSEF et al. 2016) e argamassas (GUELMINEA et al. 2016; CORREDOR-BEDOYA et al. 2017) e tem trazido benefícios na área da construção civil.

Por outro lado, a areia natural está se tornando cada vez mais rara devido ao intenso emprego no setor da construção civil, sendo urgente a reciclagem de resíduos (BOUKOUR e BENMALEK, 2016). Dessa forma, a construção civil é um dos setores que têm absorvido grandes quantidades de resíduos sólidos reciclados.

A norma brasileira ABNT NBR 15575:2013 trata do desempenho da edificação para o usuário e abrange: segurança, sustentabilidade e habitabilidade. O desempenho acústico e térmico são requisitos importantes de habitabilidade e se refere à adequação de certos componentes da construção, como fachadas, coberturas, entrespisos e paredes para um isolamento eficiente.

Diante disso, o uso de borracha de pneus em argamassa de revestimento pode apresentar resultados positivos em relação ao desempenho acústico e térmico de uma edificação. Em substituição parcial do agregado miúdo, é possível produzir argamassa com características isolantes.

Este trabalho foi desenvolvido utilizando resíduos de borracha resultante do processo de recauchutagem de pneus em argamassas, substituindo parcialmente o agregado miúdo. E teve por objetivo avaliar as características físicas, mecânicas, acústicas e térmicas de argamassas aplicadas em assentamento e revestimento de tetos e paredes.

1.1 JUSTIFICATIVA

A qualidade e o conforto das edificações sempre motivaram diversos estudos e pesquisas para o desenvolvimento de novos materiais, sistemas e equipamentos para a indústria da construção civil. Desde 2013, quando entrou em vigor a norma de Desempenho de Edificações (ABNT NBR 15575:2013), a qual, estabelece exigências de conforto e segurança em edificações, vem sendo estudado em diversas áreas da cadeia produtiva, maneiras de atender os novos parâmetros de qualidade e sustentabilidade.

A construção civil é um dos setores que mais utiliza recursos naturais na sua cadeia produtiva, sendo de grande importância o desenvolvimento de produtos que utilizem de maneira sustentável esses recursos. Os pneus inservíveis são resíduos considerados inertes, causam um grande problema ambiental, pois ocupam grandes espaços em aterros, difícil armazenamento, sendo de decomposição lenta, e quando depositados de forma incorreta são criadouros de vetores de diversas doenças. Este trabalho propõe uma alternativa de emprego destes resíduos que, ao serem incorporados às argamassas, em quantidade adequada, podem melhorar suas características físicas resultando em argamassas com propriedades acústicas e térmicas sem comprometer a resistência.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as propriedades físicas, mecânicas e as características acústicas e térmicas de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de borracha de pneus provenientes do processo de recauchutagem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar as propriedades acústicas e térmicas das argamassas emborrachadas para a utilização em assentamento e revestimento de tetos e paredes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PNEU: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Por volta de 1830, a descoberta do processo de vulcanização da borracha possibilitou o desenvolvimento dos pneus como atualmente são conhecidos. Um dos pesquisadores envolvidos no desenvolvimento dessa técnica foi Nathaniel Hayward que ao misturar enxofre à borracha e expô-la ao sol percebeu que esse processo denominado solarização, diminuía sua viscosidade (CAETANO, 2018).

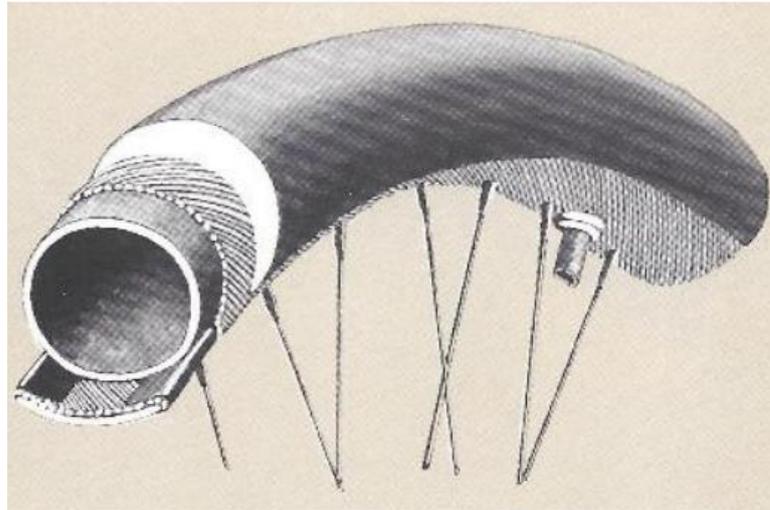
No mesmo período, na Inglaterra, Thomas Hancock também estudava uma forma de melhorar o comportamento da borracha que em sua forma sólida, quando submetida ao calor se tornava mole e pegajosa e no rigor do inverno se tornava rígida e inflexível. Outra contribuição foi do americano Charles Goodyear que, em seus experimentos, derrubou acidentalmente uma mistura de borracha com enxofre em uma placa aquecida, e percebeu que a borracha após a queima, não sofreu alteração em sua propriedade elástica (ANIP, 2018).

A partir daí, vários estudos foram realizados a fim de se determinar a quantidade de enxofre e o tempo de queima necessário para se obter uma maior resistência da borracha ao calor e ao frio. Com o processo de vulcanização, vários outros componentes como: o óxido de zinco, aceleradores de vulcanização, ácidos gordos, negro de carbono, cargas minerais, antioxidantes entre outros componentes que atualmente são incorporados na borracha, foram desenvolvidos para melhorar as propriedades mecânicas da borracha utilizada para a fabricação de pneu, principalmente a resistência ao desgaste (COSTA et al.,2003).

O pneu propriamente dito começou a ser desenvolvido em 1845 por Robert Thompson. O primeiro modelo consistia em um tubo de tecido impregnado de borracha e revestido por couro. Esse modelo foi aperfeiçoado ao se utilizar vários tubos de borracha, de paredes finas, cheios de ar, revestidos exteriormente com couro, sendo empregado inicialmente em carruagens que tinham suas rodas feitas em madeira ou ferro (ANIP, 2018).

Em 1888, John Boyd Dunlop aperfeiçoou o modelo de Thompson usando uma câmara feita de látex e válvula para o enchimento com ar, utilizando em aros de bicicletas (Figura 1).

Figura 1: Pneu desenvolvido por John Boyd Dunlop.



Fonte: <https://www.ctborracha.com> - Acesso: 29/12/2018.

O uso de pneus em automóveis foi patenteado pelos franceses Édouard Michelin e André Michelin em 1895, e com o desenvolvimento da indústria automobilística proporcionaram o aumento da indústria de pneus (CAETANO, 2018).

3.2 COMPOSIÇÃO DOS PNEUS

Os primeiros pneus foram produzidos com borracha natural, um composto originário do látex presente nas árvores denominadas de seringueiras até o desenvolvimento da borracha sintética, composta por diversos tipos de elastômeros com diferentes características técnicas, adequadas à função a desempenhar na estrutura do pneu. Na composição de um pneu, os compostos de borracha representam 75% a 78% do seu peso; o aço representa 12% a 25% do seu peso e os materiais têxteis representam de 0 a 10% do seu peso. Sendo os mais utilizados: a borracha natural (NR), poli-isopreno (IR), estireno butadieno (SBR), polibutadieno (BR), policloropreno (CR), etileno-propileno dieno (EPDM) e Poliisobutileno isopreno halogenado (CIIR ou BIIR) (CAETANO, 2018).

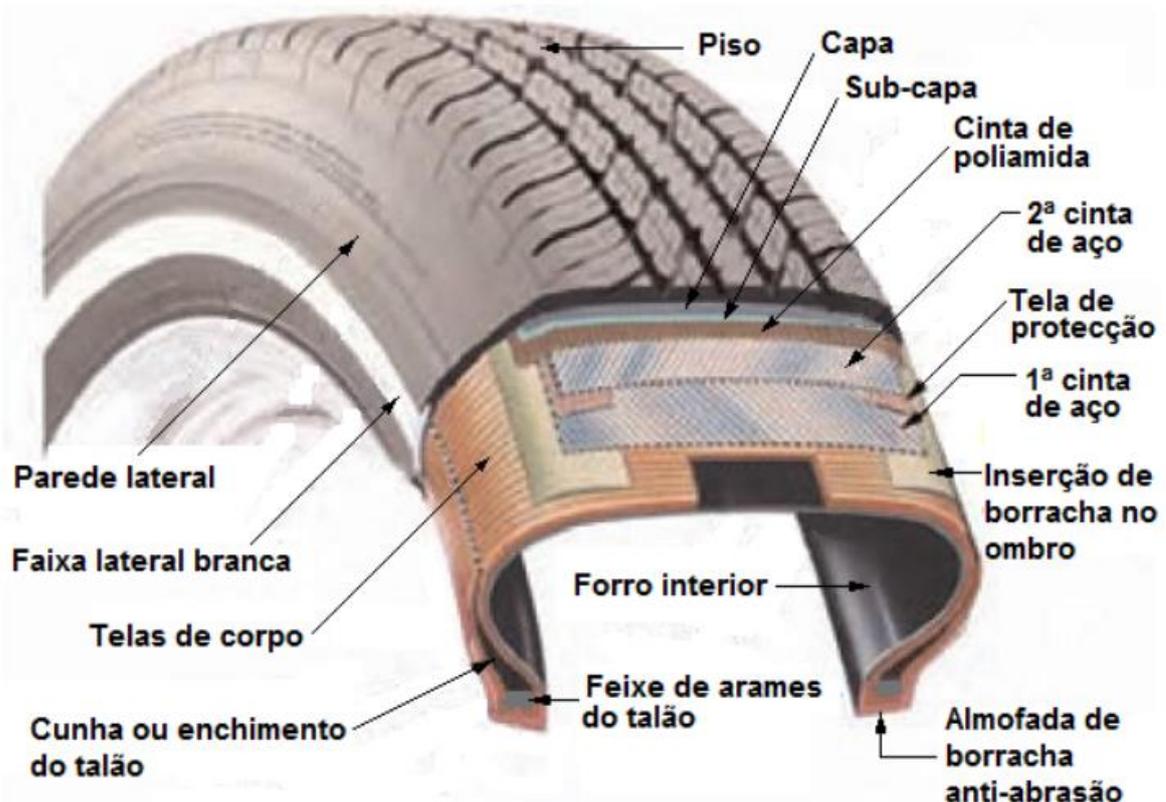
Existem máquinas para a fabricação de vários tipos e dimensões de pneus, dependendo das exigências técnicas de cada modelo, que podem ser do tipo manual, semiautomáticas ou automáticas com sistemas robotizados que não necessitam de operadores. O processo de fabricação do pneu, inicia-se com a seleção e preparação de um conjunto de matérias-primas que passam por diversos processos antes de serem utilizados na produção dos pneus.

Sua fabricação consiste basicamente na montagem da carcaça onde sobre o tambor de fabricação os aros dos talões são posicionados corretamente sobre os aplicadores e em seguida é feita a colocação do forro interior sendo colocado sobre o tambor de construção. Então, é colocada a tela de corpo que pode ser mais de uma camada dependendo do modelo do pneu e os aros dos arames dos talões são instalados automaticamente (ANIP, 2018).

São instaladas as paredes laterais do pneu que são unidas mecanicamente. A zona de piso do pneu, constituída por cintas que são aplicadas na parte central e telas de nylon calandradas com borracha são alternadamente montadas na estrutura descrita anteriormente, e outros componentes podem ser instalados dependendo do modelo do pneu. Em seguida, é instalada banda de rodagem que tem em sua base uma camada de borracha como subcapa (CAETANO, 2018).

A estrutura básica de um pneu para automóveis de passageiros está representada na Figura 2.

Figura 2: Estrutura de um pneu para veículo de passageiros.



Após a fabricação da carcaça, o pneu passa por um processo denominado picagem, a fim de se retirar o ar retido na carcaça, e então é enviado para as prensas de vulcanização (CAETANO, 2018).

A vulcanização é um processo de reticulação pelo qual a estrutura química da borracha passa por mudanças físicas e químicas que levam à alteração de suas propriedades, devido à formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas (OLIVEIRA et al., 2016).

3.3 O PNEU NO BRASIL

Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), foram fabricados no Brasil 55.083.151 unidades de pneus entre janeiro e novembro de 2019, sendo 31.161.979 unidades destinadas a veículos de passeio, 6.850.673 a veículos de carga, 9.091.322 para motocicletas e 7.127.031 para veículos comerciais leves. O mercado de reposição consumiu 39.901.435 unidades e as montadoras 15.181.716 unidades.

A Resolução CONAMA nº 416:2009, define pneus inservíveis como aqueles que sofreram danos irreparáveis em sua estrutura, não servindo mais para a circulação ou reforma.

A Resolução determina que para cada pneu novo comercializado os fabricantes ou importadoras deverão dar destinação ambientalmente adequada a um pneu inservível. Esses pneus inservíveis devem ser descaracterizados de sua forma inicial, ou seja, triturados e seus elementos reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas ecologicamente sustentáveis. A quantidade deverá ser convertida em peso de pneus inservíveis, aplicando um fator de desgaste de 30% sobre o peso do pneu novo produzido ou importado.

A borracha dos pneus, após o processo de trituração, é reaproveitada como combustível alternativo para as indústrias de cimento, fabricação de solados de sapatos, borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais, além de tapetes para automóveis e produção de asfalto-borracha (ANIP, 2018).

O Relatório de Pneumáticos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) de 2019 indicou que a destinação correta dos pneus atingiu 104,83% da meta entre os fabricantes, e os importadores cumpriram 80,34% da meta estipulada para 2018.

O coprocessamento em fornos rotativos para produção do clínquer é a principal tecnologia utilizada para destinação correta dos pneus inservíveis, sendo responsável por 57,64% do total de pneumáticos destinados nacionalmente. A Figura 3 apresenta as principais tecnologias de destinação dos pneus inservíveis de 2009 a 2018.

Figura 3: Principais tecnologias de destinação dos pneus inservíveis.



Fonte: IBAMA, 2019.

Existem diversas tecnologias utilizadas como forma de destinação adequada aos pneus inservíveis, e, em 2019 as principais tecnologias utilizadas no Brasil, segundo o Relatório de Pneumáticos 2019 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), foram:

Coprocessamento: É a utilização dos pneus inservíveis picados em fornos rotativos, como substituição parcial do combustível, para a produção do clínquer nas indústrias de cimento (UTEF, 2019);

- **Granulação:** É o processo de trituração e moagem que transforma a borracha de pneus inservíveis em grânulos com dimensões entre 0,60 mm e 100,00 mm. O granulado de borracha pode ser utilizado com diversas finalidades como na composição do asfalto de rodovias e ferrovias, quadras esportivas, nos setores da construção civil, composição de biomassa, indústria calçadista, autopeças, entre outros (UTEF, 2019);

- **Laminação:** Processo no qual a borracha é laminada e utilizada na fabricação de artefatos de borracha (CONAMA, 2009);

- **Industrialização de xisto:** O xisto betuminoso é processado para a obtenção de petróleo bruto, o Processo Petrosix®, patenteado pela unidade produtiva de Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) adiciona à carga de xisto processada, cerca de 5% em peso de pneus picados. Os produtos gerados nesse processo são óleo, gás combustível e enxofre. Uma tonelada de pneus rende cerca de 530 kg de óleo, 40 kg de gás, 300 kg de negro de fumo e 100 kg de aço (PETROBRÁS, 2019);

- **Regeneração:** Consiste na restauração de pneus usados, reaproveitando a estrutura onde é aplicada a banda de rodagem, ombro ou flancos, utilizando prensas especiais que trabalham sob pressão e/ou calor, com o fim específico de aumentar sua vida útil (CONAMA, 2009);

- **Pirólise:** A reciclagem química pode ser térmica ou catalítica, que converte os resíduos de borracha de pneus em produtos de maior valor agregado, como por exemplo, combustíveis líquidos ou carvão (Pinho et al., 2018).

A Reciclanip, entidade sem fins lucrativos criada em 2007, que atua na política da logística reversa na indústria de pneus, divulgou que 55.846.025 unidades de pneus para veículo de passeio tiveram a destinação correta no ano de 2019.

Segundo o CONAMA nº 416:2009, as reformas em pneus como a recapagem, recauchutagem e remoldagem não são consideradas tecnologias para a destinação adequada de pneus inservíveis por ainda estarem em uso não sendo contabilizadas em seus relatórios, porém a reforma dos pneus é um método para o aumento de sua vida útil.

Além do aumento da vida útil dos pneus, os processos de reforma em pneus apresentam outras vantagens como economia de matéria prima e energia, menor custo para venda e redução nos impactos negativos ao meio ambiente. No entanto, o processo de reforma, ainda que reduzido, gera resíduos como, por exemplo, as raspas de pneus (LAGARINHOS E TENÓRIO, 2008).

3.4 O USO DA BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS COMO AGREGADO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Diversos estudos vêm sendo realizados a fim de se empregar adequadamente a borracha de pneus inservíveis, sendo elas obtidas por trituração do pneu ou por meio de raspagem na indústria de recauchutagem.

Canova et al. (2007) pesquisaram argamassas de revestimento com resíduos de pneus inservíveis, produzidas com cimento, cal virgem e areia, no traço 1: 1,5: 9 (em volume) com adição de pó de borracha, nas proporções 0, 6, 8, 10 e 12% do volume de agregado. Avaliaram a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água no estado fresco, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação estática, absorção de água por imersão no estado endurecido e resistência de aderência à tração e a fissuração em corpos de prova aplicados sobre substrato. Concluíram em seus estudos que as argamassas contendo 8% de resíduos de borracha apresentaram menores incidências de fissuras no revestimento ao serem comparadas à argamassa convencional.

Fioriti et al. (2007) estudaram o uso de resíduos de borracha em blocos de concreto para pavimentação intertravada. Foram incorporados ao concreto, níveis de 8%, 10% e 12%, em volume. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão, absorção de água e resistência ao impacto. Os resultados mostraram que apesar da queda na resistência à compressão, os blocos de concreto para pavimentação intertravada, demonstraram uma grande capacidade de absorção de energia (tenacidade), não apresentando uma ruptura frágil como os blocos sem resíduos.

Cintra et al. (2014) estudaram a substituição parcial de vermiculita por resíduos de borracha em argamassas, e constataram uma melhora na aderência à tração da argamassa no substrato de concreto, diminuição na retração, melhora na resistência à compressão uniaxial e diametral comparada a argamassa que utilizou somente vermiculita sem alterar a trabalhabilidade e aplicabilidade das argamassas.

Holmes et al. (2014) estudaram painéis de concreto utilizando substituições de 10%, 20%, e 30% do agregado fino por fibras de borrachas. Foram confeccionados painéis de concreto e ensaiados em câmara reverberante utilizando diferentes frequências sonoras. Avaliaram a capacidade de absorção e isolamento do concreto após passar por processo de congelamento e aquecimento.

Observaram que todos os painéis de concretos emborrachados apresentaram melhores coeficientes de absorção, principalmente os que continham níveis mais altos de substituição de borracha. Já para o ensaio de isolamento acústico, os painéis mais densos, ou seja, com menor teor de substituição, apresentaram melhores coeficientes de absorção para o som com frequências mais altas, devido à maior superfície afetada, corroborando com a afirmação que o concreto é um bom isolante, mas não tão eficaz como atenuante acústico. No entanto, essas conclusões demonstraram que o uso do concreto emborrachado pode ser positivo na redução do ruído em ambientes urbanos.

Segundo Canova et al. (2015) na engenharia, a borracha de pneus vem sendo utilizada na composição de pavimentação asfáltica como ligante, proporcionando pavimentos com propriedades de resistência ao acúmulo de deformação (maior rigidez à elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga. Em seu trabalho, compararam o comportamento de dois tipos de argamassa utilizando agregado natural e agregado artificial derivado de resíduos de pedra, sendo que em cada tipo de argamassa foi acrescido de 8% de pó de borracha. Nas misturas foi utilizado cimento, cal virgem, areia natural ou artificial no traço 1: 1,5: 9 (em volume). Avaliaram a massa específica, o teor de ar incorporado, a retenção e exsudação de água no estado fresco. No estado endurecido, avaliaram a resistência à compressão, o módulo de deformação e absorção de água por capilaridade e fissuração. Concluíram que a adição do pó de borracha reduziu a ocorrência de fissuração e a taxa de capilaridade. Houve uma redução no módulo de deformação estática, favorecendo a capacidade de absorver deformações. Verificaram também que o pó de borracha contribui para o fechamento da estrutura porosa da argamassa, resultando em uma maior retenção de água de amassamento.

Silva et al. (2017) confirmaram ser viável o uso de fibras de borracha na produção de pisos de concreto intertravados para tráfego pesado. Em seus estudos o agregado miúdo é substituído em massa pelo resíduo de borracha nas proporções de 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10%, 20% e 50%. Os pesquisadores utilizaram para a produção das amostras: cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, resíduos de borracha e aditivo superplastificante. Segundo o estudo, o uso de até 10% de substituição apresentou uma melhora na resistência à compressão dos pisos.

Pcziecsek et al. (2017) estudaram argamassa com substituição de agregado miúdo pelo pó de borracha nas proporções 10%, 20% e 30% e pelo poliestireno expandido (EPS) nas proporções 7,5% e 15%. Analisaram o índice de consistência, densidade, teor de ar incorporado e retenção de água no estado fresco e resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica no estado endurecido. Concluíram que a aplicação de pó de borracha contribuiu para o aumento dos níveis de ar incorporado, redução da massa específica e diminuição da resistência à compressão quando comparada com a argamassa de referência aos 28 dias. Porém resultou em um material mais leve e funcional.

Angelin et al. (2018) desenvolveram um estudo para a produção de concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com agregados leves e reciclados. Fixaram as dosagens de sílica ativa, pó de pedra, pedrisco, argila expandida e superplastificantes, variando-se a porcentagem do resíduo de borracha em 5% e 10%, em substituição ao agregado miúdo. Embora as amostras tenham apresentado queda na resistência mecânica, todas as misturas apresentaram coesão e consistência adequadas para o manuseio e moldagem das amostras sem perder a trabalhabilidade. Conforme os resultados obtidos os concretos foram classificados como concretos autoadensáveis.

Kurz et al. (2018) estudaram argamassas com traço 1:3, substituindo o volume de agregado miúdo em taxas de 2,5%, 5%, 10% e 15% pelo resíduo de borracha em frações passantes nas peneiras granulométricas: 2,00; 1,18; 0,60; 0,30 mm. Concluíram que, as argamassas com 10% de substituição apresentaram melhor desempenho em relação à taxa de absorção com uma redução de 30,07% em relação à argamassa sem resíduo. Constataram também que todas as argamassas com resíduos apresentaram massa específica inferior à argamassa de referência, resultando em uma argamassa leve.

3.5 ARGAMASSAS

Segundo a ABNT NBR 13281:2005, a argamassa é uma mistura homogênea de aglomerantes inorgânicos, agregados miúdos e água, podendo conter aditivos ou não, com propriedades de aderência e endurecimento.

As argamassas podem ser classificadas com relação a vários critérios, quanto ao uso, tipo de aglomerante ou forma de preparo e fornecimento. Quanto ao uso, as argamassas podem ser:

- Argamassas para assentamento: fazem a união entre os componentes da alvenaria como blocos e tijolos, podendo ser argamassas estruturais ou comuns.
- Argamassas de encunhamento: utilizadas para assentar a última fiada de um componente de vedação.
- Argamassas para revestimento de tetos e paredes: são diferenciadas dependendo do local de sua aplicação como uso interno ou externo, e podem ser utilizadas também como emboço ou em camada única.
- Argamassas para reboco ou massa fina: indicadas para cobrimento de emboço, propiciando uma superfície uniforme. Há ainda argamassas decorativas em camada fina e decorativa em monocamada.

Para cada uso a ABNT NBR 13749:2013 especifica quais as espessuras de argamassa são apropriadas (Tabela 1).

Tabela 1: Espessuras das argamassas para tetos e paredes.

Revestimento	Espessura (mm)
Parede interna	$5 \leq e \leq 20$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Tetos internos e externos	$e \leq 20$

Fonte: ABNT NBR 13749:2013.

De maneira geral, as funções das argamassas são: regularizar a superfície das alvenarias criando uma base para receber os acabamentos finais como pintura ou outro tipo de revestimento; atuar como isolante térmico e acústico, proporcionando estanqueidade à edificação protegendo-a contra as intempéries; apresentar textura uniforme, sem imperfeições como cavidades, fissuras, manchas

ou eflorescências; possuir características flexíveis com capacidade de absorver as deformações sem a ocorrência de microfissuras (ABNT NBR 13749, 2013).

Podem ser classificadas como aéreas ou hidráulicas, industrializadas ou dosadas na obra, ou ainda, de acordo com o aglomerante utilizado, como argamassas mistas compostas por dois tipos de aglomerantes (cimento e cal virgem ou hidratada) ou simples a base de cimento (FIORITO, 2009).

3.6 REQUISITOS PARA ARGAMASSAS PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS

A ABNT NBR 13281:2005 determina os requisitos que as argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos devem atender, sejam elas industrializadas, dosadas e preparadas em central ou preparadas em obra.

Os requisitos estabelecidos na norma classificam as argamassas segundo suas características e propriedades físicas e mecânicas e indica o método de ensaio que deve ser utilizado para determinar essas características.

A trabalhabilidade, consistência e retenção de água são propriedades da argamassa no estado fresco que estão interligadas. Obter uma mistura coesa vai resultar em uma argamassa de fácil manuseio, boa durabilidade e resistência.

3.6.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade complexa para ser determinada, que depende tanto do conhecimento das técnicas de preparo, como dos princípios envolvidos em sua característica física como consistência, coesão e segregação (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A consistência e a plasticidade são características condicionantes da trabalhabilidade. A consistência está relacionada à quantidade de água contida na mistura e determina se a argamassa é do tipo seca, plástica ou fluida. A plasticidade está relacionada à quantidade de aglomerantes, agregados, tempo de mistura e finos contidos na mistura, sendo classificada como pobre (áspera, magra), média (plástica) ou rica (gorda) (CARASEK, 2010).

Yu e Zhu (2016) estudaram três grupos de argamassas com diferentes granulometrias de resíduos de borracha, para avaliarem os efeitos do tamanho das partículas de borracha nas propriedades da argamassa como consistência e densidade de massa no estado fresco. Com o acréscimo de borracha, verificaram

que a consistência da argamassa diminui conforme ocorre a diminuição do tamanho das partículas de borracha.

Kurz et al. (2018) constataram que, com o aumento da substituição dos teores de borracha nas argamassas ocorreu uma diminuição no índice de consistência, sendo necessário um aumento na relação a/c para que fosse mantida a trabalhabilidade.

3.6.2 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade que a argamassa tem de manter a água de amassamento sem ocorrer perda para a atmosfera por meio de evaporação, proporcionando a hidratação adequada às partículas de cimento e garantindo a trabalhabilidade durante os mecanismos de aplicação. A retenção de água também afeta as propriedades da argamassa no estado endurecido, como a aderência, a resistência mecânica e a durabilidade do material (CARASEK, 2010).

A ABNT NBR 13281:2005 classifica as argamassas segundo sua capacidade de retenção de água, indicada na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação pela retenção de água.

Classe	Retenção de água (%)	Método de ensaio
U1	≤ 78	ABNT NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

3.6.3 Densidade de massa ou massa específica

A densidade de massa e o teor de ar incorporado no estado fresco também são propriedades que dependem dos materiais constituintes das argamassas. São características avaliadas para determinar se as argamassas são do tipo leves, normais ou pesadas (Tabela 3). A densidade da argamassa também está associada à capacidade do agregado em reter o ar por toda sua superfície áspera e irregular. Esta característica indica seu uso na produção de peças mais leves e uma melhor produtividade no canteiro de obras, pois, a argamassa se torna

mais trabalhável (ANGELIN et al., 2017).

A ABNT NBR 13281:2005 estabelece os requisitos para as argamassas. As Tabelas 3 e 4 apresentam as classificações segundo sua densidade de massa, tanto no estado fresco como no estado endurecido, inclusive os métodos de ensaio.

Tabela 3: Densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	Método de ensaio
D1	≤ 1400	ABNT NBR 13278
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	>2000	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

As argamassas no estado endurecido apresentam valores inferiores em relação às argamassas no estado fresco, devido à perda de massa ocasionada pela evaporação da água e reações químicas no processo de cura.

Tabela 4: Densidade de massa no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)	Método de ensaio
M1	≤ 1200	ABNT NBR 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	> 1800	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

Vários autores estudaram a substituição do agregado miúdo por resíduos de borracha em concretos e argamassas, como:

Holmes et al. (2014) observaram que o uso de fibras de borracha como agregado aumentou a porosidade dos concretos estudados por eles, devido a maior

incorporação de ar ocasionada pela superfície irregular das fibras de borracha, resultando em densidades de massa com valores mais baixos.

Canova et al. (2015) verificaram que argamassas com resíduos de borracha apresentam redução significativa do aparecimento de fissuras visíveis no revestimento, aumento do teor de vazios e retenção de água, com redução da exsudação e da absorção de água por capilaridade.

Ainda, em relação à densidade de massa, Yu e Zhu (2016) constataram comportamento semelhante, pois as argamassas com maior teor de substituição e maior granulometria, também apresentaram densidades mais baixas.

Boukour e Benmalek (2016) afirmam que baixa densidade dos agregados de borracha é responsável pela redução de 18% na densidade de massa das argamassas com 30% de substituição ao serem comparadas à argamassa de referência.

Youssfa et al. (2017) desenvolveram em sua pesquisa argamassas emborrachadas e constataram que a densidade das argamassas diminui com o aumento do teor de substituição, por ser a densidade da borracha mais baixa que a dos agregados naturais e, devido ao formato e textura das fibras de borracha, bolhas de ar que ficam aprisionadas na matriz cimentícia contribuindo para o aumento da porosidade da argamassa.

Angelin et al. (2017) estudaram a porosidade de argamassas contendo 30% de substituição dos agregados naturais pelos resíduos de borracha em formato de fibras e esferóides. Em relação à densidade de massa, observaram uma redução de aproximadamente 27% em relação à argamassa de referência.

Segundo Aslani e Kelin (2018), a borracha é um material muito versátil e pode ser empregada na construção civil para diversas finalidades. Ao se substituir parcialmente o agregado miúdo pela borracha, é possível produzir uma argamassa leve, devido a sua baixa densidade de massa. Estas são características positivas em relação à argamassa convencional, pois, reduz o peso nos sistemas estruturais.

3.6.4 Estanqueidade

As principais funções das argamassas para revestimento de paredes e tetos é proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo e proporcionar isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança, resistência ao fogo, resistência ao desgaste e a abalos superficiais (SOUZA, 2010).

Sendo assim, uma das propriedades importantes a ser avaliada é o coeficiente de capilaridade, que determina a capacidade das argamassas de absorver água, ou seja, sua permeabilidade.

A ABNT NBR 13281:2005 estabelece os requisitos para as argamassas, classificando-as segundo seu coeficiente de capilaridade (Tabela 5).

Tabela 5: Classificação segundo o coeficiente de capilaridade.

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² . min ^{1/2})	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	> 10,0	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

Ferreira (2009) afirma que as argamassas emborrachadas apresentam valores reduzidos de absorção de água por capilaridade, devido à característica hidrofóbica da borracha, ficando a absorção limitada à matriz cimentícia. Contudo o coeficiente de absorção é maior, pois a velocidade de absorção aumenta com o teor de borracha. Em seus estudos com argamassas emborrachadas, os valores de absorção variaram de 0,5 g/cm² a 1,0 g/cm², para substituições de 10% a 30% de resíduos de borracha.

Cintra (2013) observou comportamento semelhante em relação à absorção de água por capilaridade em argamassas emborrachadas, corroborando com a afirmação de que a borracha tende a repelir a água. Em seus estudos de argamassa com borracha e vermiculita, constatou que as argamassas com maiores teores de borracha absorveram 2,03 g/cm² para as argamassas com 10% de substituição e 1,80 g/cm² para as argamassas contendo 35% de substituição.

Canova et al. (2015) observaram uma tendência de redução nos valores de absorção por imersão com o aumento da adição do pó de borracha nas argamassas emborrachadas. Os resultados obtidos variaram de 17,1% para a absorção da argamassa de referência, para 16,82% para as argamassas com 12% de substituição.

Kurz et al. (2018) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de argamassas com 2,5%, 5%, 10% e 15% de substituição de areia por borracha, sendo o traço de referência 1:3 (em massa). Os agregados foram separados em quatro frações granulométricas e divididos em subfamílias. No ensaio de absorção de água por capilaridade, verificaram que a família com 10% de substituição alcançou absorção inferior a argamassa de referência em três substituições. No entanto, no ensaio por imersão, a absorção aumentou com a crescente porcentagem de resíduo de borracha, sendo que a família contendo 2,5% de borracha, resultou em uma absorção inferior a encontrada para a argamassa de referência.

3.6.5 Resistência mecânica das argamassas

Segundo Carasek (2010), as argamassas devem apresentar a capacidade de suportar esforços mecânicos sem comprometer sua aderência, estanqueidade e durabilidade. Esses esforços podem ser ocasionados pelo comportamento do substrato ao qual a argamassa foi aplicada, como recalque, dilatação ou contração gerando forças de tração, compressão e cisalhamento provocando fissuras e falha na aderência da argamassa com a base. Porém a resistência da argamassa não deve ser maior que a do substrato ao qual esta foi aplicada, inclusive se tratando de argamassas de assentamento, onde a alta resistência da argamassa pode prejudicar a capacidade de absorver as deformações da alvenaria.

A Tabela 6 apresenta a classificação das argamassas em relação à resistência à compressão, segundo a ABNT NBR 13281:2005.

Tabela 6: Classificação segundo a resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

A retração nas argamassas é um processo que se inicia no estado fresco, em consequência das reações químicas de hidratação do cimento e prossegue durante a secagem, que, quando ocorre de forma lenta e gradual, possibilita a argamassa atingir uma resistência à tração capaz de absorver as tensões internas que se formam. Porém, quando a argamassa perde água rapidamente devido às condições climáticas ou à absorção do substrato, essas tensões de tração internas ocasionam o surgimento de fissuras e microfissuras, comprometendo a resistência e estanqueidade da alvenaria (CARASEK, 2010). A capacidade de resistência às tensões de tração está relacionada ao módulo de elasticidade da argamassa. A ABNT NBR 13281:2005 classifica as argamassas segundo sua resistência à tração na flexão indicada na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação segundo a resistência à tração na flexão.

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	$\leq 1,5$	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	$> 3,5$	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

A utilização de borracha como agregado proporciona a queda nos valores das resistências mecânicas em compósitos cimentícios, causada pela fragilidade da interface entre a borracha e a matriz. Como forma de melhorar esta zona de transição, existem técnicas para o tratamento das fibras de borracha a fim de melhorar a aderência entre a borracha e a matriz cimentícia, e consequentemente a resistência mecânica das argamassas emborrachadas.

Guo et al (2017) utilizaram o método de tratamento da borracha com solução de NaOH e três tipos de cimento: normal, com sílica ativa e silicato de sódio. Nas amostras com o tratamento de NaOH houve uma melhora significativa na resistência, quando comparadas às amostras sem tratamento.

Angelin et al. (2019) ao estudarem traços de argamassas utilizando borracha na forma de fibras e de esferóides e aditivo plastificante à base de éter

policarboxílico como forma de diminuir a relação água/cimento e melhorar a trabalhabilidade das argamassas, observaram que, em até aproximadamente 15% de substituição do agregado pelas fibras de borracha, a argamassa apresenta uma resistência mecânica adequada.

Canova et al. (2015) concluíram em seus estudos sobre argamassas emborrachadas, utilizando agregado miúdo natural ou artificial, que o módulo de elasticidade das argamassas emborrachadas com areia artificial foi ligeiramente superior ao módulo das argamassas com areia natural. Porém, a adição de pó de borracha levou a uma redução no módulo de elasticidade, apresentando uma melhora na capacidade de absorver deformação.

Guo et al. (2017) estudaram o concreto com substituição do agregado por resíduo de borracha utilizando pré-tratamento superficial com NaOH. No ensaio de ultrassom, constataram que a velocidade de transmissão do som diminuiu com a adição dos resíduos de borracha devido a menor rigidez do material, concluindo que o módulo dinâmico das amostras com 15% e 25% de resíduo de borracha tratada com solução de NaOH diminuiu 6,3% e 25,6% respectivamente.

3.6.6 Aderência

A aderência é uma propriedade da argamassa que depende da base na qual esta foi aplicada, pois é resultado da interação entre os materiais, de forma que, permita a absorção das tensões normais ou tangenciais que surgem na interface substrato-argamassa (PCZIECZEK, 2017).

Segundo Fiorito, (2009) o sistema de alvenaria é composto por diferentes materiais interligados, onde a aderência da argamassa está relacionada com os elementos da alvenaria, com a trabalhabilidade, resistência à compressão, retenção de água, além das características e propriedades dos materiais constituintes da argamassa e de fatores externos como as condições climáticas. A quantidade dos materiais constituintes da argamassa também afeta a aderência. As argamassas com alto teor de cimento possuem alta resistência, porém, podem desenvolver fissuras, diminuindo sua durabilidade. Já a adição de areia na argamassa pode diminuir a resistência, mas ajuda a diminuir a retração, favorecendo a durabilidade.

A ABNT NBR 13281:2005 classifica as argamassas segundo a resistência potencial de aderência à tração, apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Classificação segundo a resistência potencial de aderência à tração.

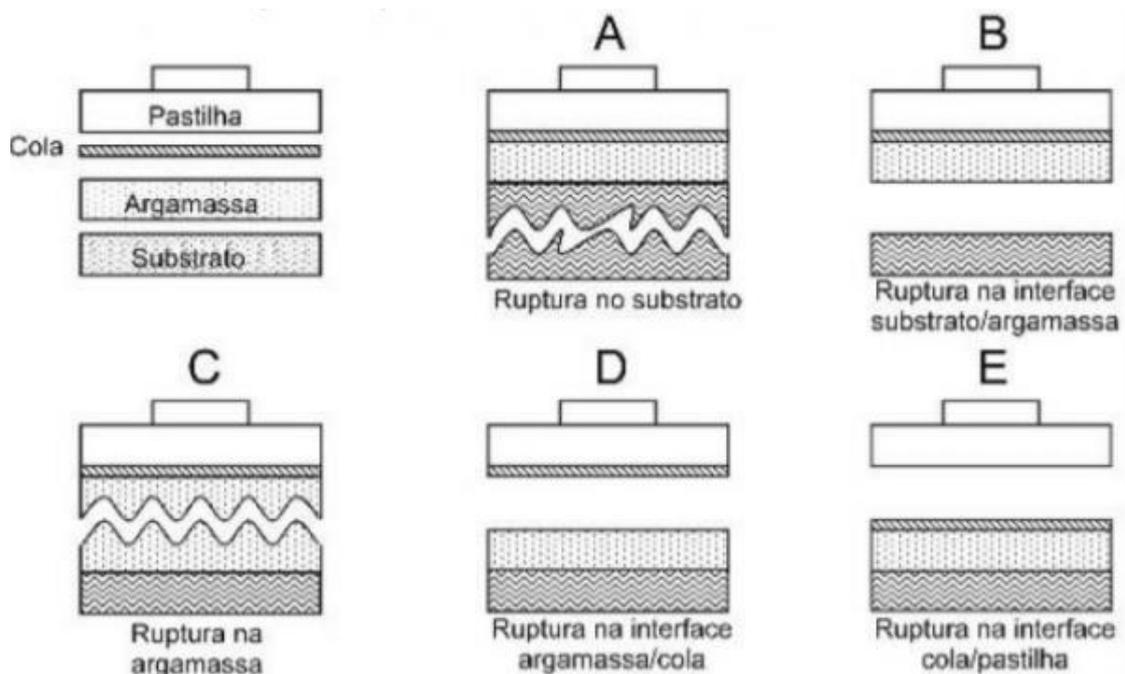
Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Método de ensaio
A1	< 0,20	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

3.6.7 Ensaio de resistência potencial de aderência à tração

As formas de ruptura ilustradas na Figura 4 representam um aspecto tão importante quanto o valor da resistência de aderência obtido. São vários os aspectos dos corpos de provas após as rupturas, que podem ser do tipo A (adesiva), quando ocorre na interface argamassa substrato e com valores mais elevados; do tipo B e C (coesiva) que ocorrem no interior da argamassa ou da base, com valores menos preocupantes; as rupturas tipo D indicam que a camada superficial do revestimento é mais fraca possivelmente por apresentar pulverulência; já as rupturas do tipo E indicam falha na colagem e seus resultados devem ser descartados (CARASEK, 2010).

Figura 4: Tipos de ruptura.



Fonte: ABNT NBR 13528-2:2019.

Cintra et al. (2014) estudaram quatro composições de argamassa, sendo, dois traços utilizando cimento, cal, areia, vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus e dois traços contendo cimento, cal, areia e vermiculita expandida. Aditivos especiais foram utilizados, um a base de sal sódico de ácido naftaleno sulfônico (SSNS) em pó, de função superplastificante e a microssílica. Nos ensaios de aderência à tração, obtiveram um melhor resultado para as argamassas contendo 33% de borracha, que correspondeu a um aumento de aproximadamente 40% em relação à argamassa de referência. Concluíram que a incorporação das fibras de borracha contribui para a aderência da argamassa no substrato.

Canova et al. (2015) estudaram argamassas para revestimento utilizando cimento, cal virgem e areia como referência e substituíram o agregado de pó de borracha nos teores de 6, 8, 10 e 12%. Entre outros ensaios, realizaram o teste de resistência de aderência à tração, utilizando blocos cerâmicos com aplicação de chapisco como substrato. O limite de aderência à tração ficou abaixo do especificado pela norma, porém não houve redução na média da argamassa que recebeu os teores de pó de borracha em relação à argamassa de controle.

Pcziecsek (2017) elaborou um traço de argamassa contendo 20% de cinza volante com 5% de borracha e outro sem adições (traço de referência). Os resultados do teste de resistência de aderência à tração da argamassa de referência, apresentaram um valor médio de 0,31 MPa com rupturas na interface substrato/chapisco e chapisco/argamassa. A argamassa contendo cinza volante e borracha apresentaram resultados de ruptura em torno de 0,33 MPa, ocorrendo com maior frequência também na interface substrato/chapisco e chapisco/argamassa. A pesquisadora concluiu que é possível utilizar os traços estudados de argamassas emborrachadas para revestimento em paredes internas e externas, pois estes atenderam a ABNT NBR 13281:2005.

3.7 MICROESTRUTURA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Os compósitos cimentícios são constituídos basicamente por uma fase sólida, porosa, composta por vários elementos com características físicas e composições químicas distintas. E outra fase composta pelos agregados utilizados na mistura, cada qual com suas características físicas e composições químicas que dependem do método de extração, localização das jazidas e outros diversos fatores que alteram essas características (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A água utilizada para hidratação da mistura interage com elementos como o cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas presentes na composição do cimento e dão origem aos cristais trissulfoaluminato de cálcio hidratado, a etringita e ao hidróxido de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Esses cristais formam uma rede aberta de poros que são progressivamente saturados com íons de silício e alumínio. Uma parte dessa água é adsorvida na interface da matriz cimentícia com o agregado criando uma zona rica em cristais, conseqüentemente mais instável e frágil, chamada zona de transição (PAULON e KIRCHHEIM, 2011).

Mehta e Monteiro (2014), afirmam que a espessura e a qualidade da zona de transição exercem uma forte influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto.

Raffoul et al. (2016) após a análise microestrutural do cimento emborrachado concluíram que a hidrofobicidade e a textura da borracha enfraquecem a ligação entre a pasta e borracha. Verificaram uma maior porosidade na interface da matriz cimentícia e a borracha bem como, uma zona de transição maior quando comparada ao concreto convencional.

Angelin et al. (2017) afirmam a importância de se realizar estudos à fim de encontrar materiais que possam vir a melhorar a qualidade da microestrutura na zona de transição da pasta de cimento.

As Figuras 5 e 6 apresentam as fases do concreto e a zona de transição na interface do agregado com a matriz.

Figura 5: Fases do concreto a olho nu.

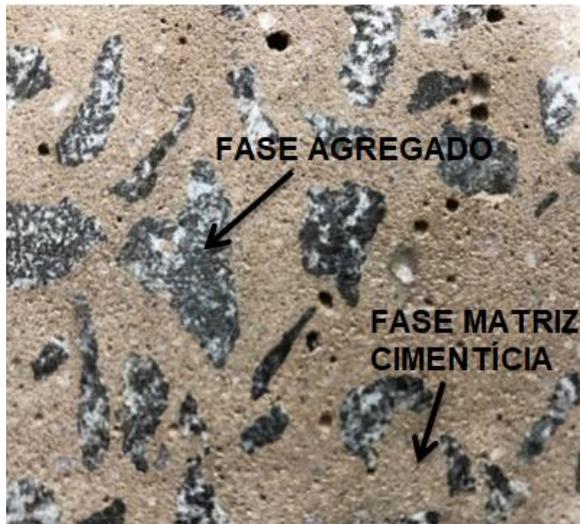
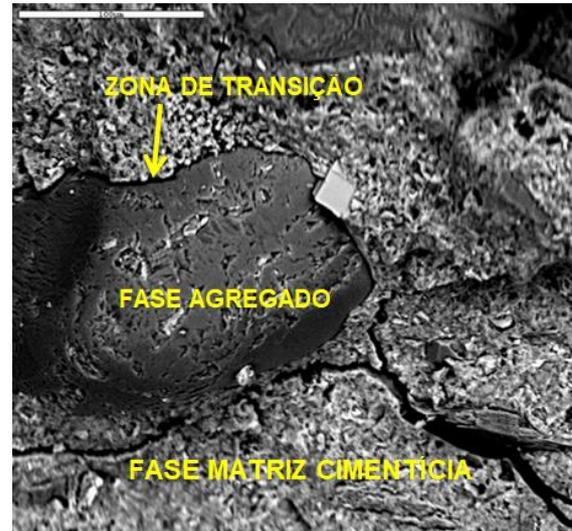


Figura 6: Fases do concreto a 100 µm.



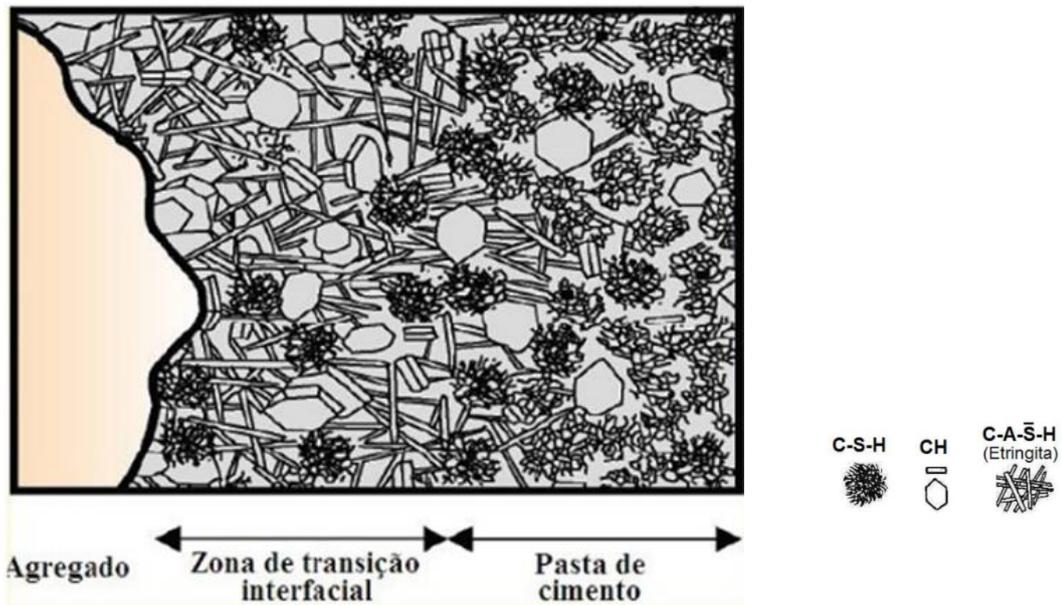
Segundo Mehta e Monteiro (2014), durante o processo de hidratação e cura, outros elementos vão se formando para compor a fase sólida da mistura como:

- O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que são cristais de morfologia variada com tendência de se aglomerarem. Esta é a fase mais importante da mistura, pois, determina a resistência e durabilidade do concreto;
- O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que são cristais com morfologia prismática hexagonal com dimensões que dependem do espaço e temperatura de hidratação para se formarem, por terem a área superficial limitada, não afetam diretamente a resistência do concreto;
- Os sulfoaluminatos de cálcio que não interferem na resistência, porém podem tornar o concreto vulnerável ao ataque por sulfatos.

Os diversos tipos de vazios presentes na pasta de cimento como os vazios capilares, vazios originados pelo ar incorporado, os espaços interlamelares no C-S-H também podem influenciar nas propriedades do concreto como resistência e permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 7 demonstra esquematicamente a interface entre o agregado e a pasta de cimento.

Figura 7: Representação esquemática da zona de transição.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Grupta et al. (2016) ao estudarem o concreto com substituição de agregado miúdo por fibras de borracha constataram o aumento da quantidade de poros, influenciando suas propriedades no estado fresco e endurecido. Microfissuras também foram constatadas, enfraquecendo a interface entre a fibra de borracha e a matriz cimentícia.

Angelin et al. (2017) afirmam que o ar retido, os poros capilares, poros de gel e o ar incorporado na argamassa estão diretamente associados a hidratação das partículas de cimento. Durante o processo de cura, os produtos de hidratação como silicato de cálcio e o C-S-H, determinam a porosidade entre os cristais de hidratação. Os poros são resultado do ar incorporado durante o processo de elaboração da argamassa com borracha apresentando características esferoidais, já o ar retido constitui os poros irregulares.

3.8 CONFORTO ACÚSTICO NAS EDIFICAÇÕES

O conforto acústico é um dos requisitos que determina a qualidade de vida dos usuários da edificação e o bom funcionamento das atividades nela desenvolvidas.

O conforto acústico tem se mostrado um importante fator na construção civil atualmente. O desenvolvimento de novos materiais e métodos construtivos (que devem ser definidos ainda na fase projetual dos edifícios) tem visado uma maior qualidade acústica dos ambientes.

O crescimento acelerado das áreas urbanas e o aumento da frota de veículos automotores aumentaram significativamente os níveis de ruído produzidos no exterior das edificações, que, quando somado ao ruído produzido em seu interior, decorrente das atividades desenvolvidas, podem provocar transtornos como irritabilidade, stress, insônia, aumento de pressão arterial e em casos mais graves a perda da audição (BISTAFA, 2011) .

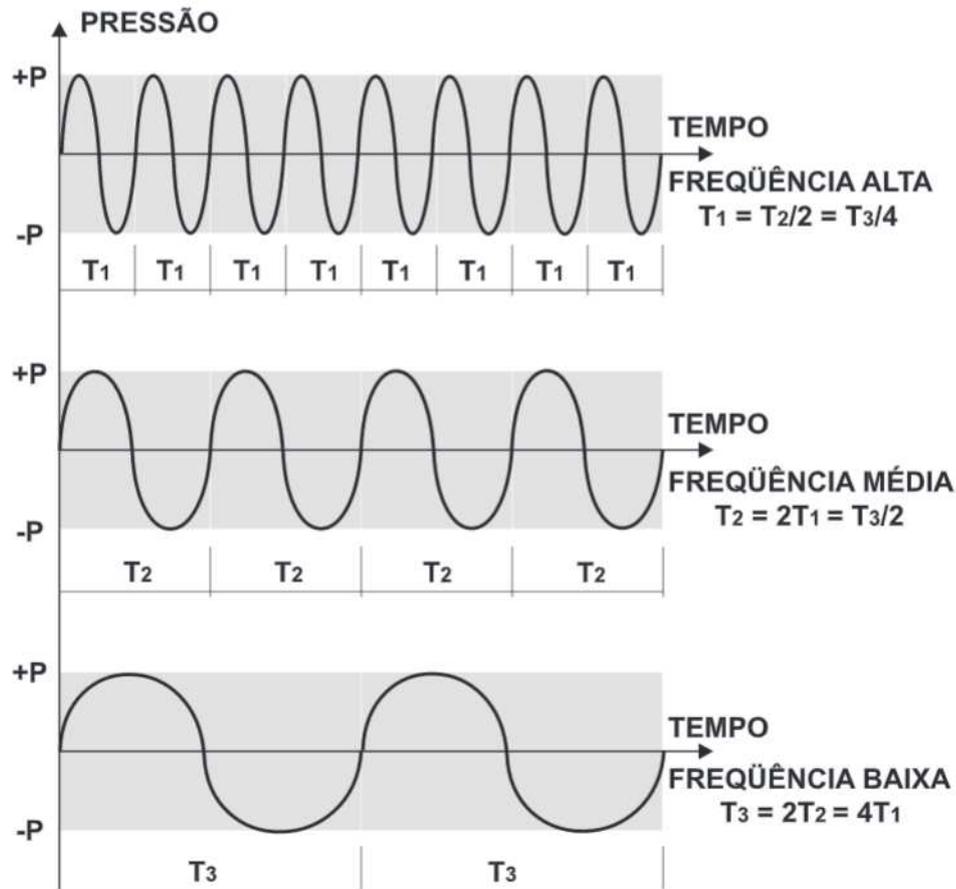
Portanto o planejamento acústico de um ambiente é fundamental para que as especificações de conforto e funcionalidade sejam atendidas para cada tipo de uso e seus habitantes.

3.8.1 O som

O som é uma onda gerada por um corpo vibrante que se propaga em um meio sólido, líquido ou gasoso, podendo conter uma maior ou menor carga de energia dependendo da fonte geradora, sendo possível determinar seu direcionamento.

Com a vibração, as moléculas do meio se movimentam formando ondas cíclicas (ciclos) em determinados intervalos de tempo, que são denominados períodos. O número de ciclos por período se chama frequência, cuja unidade de medida é o Hertz (Figura 8), em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (CARVALHO, 2010).

Figura 8: Representação das frequências.



Fonte: Carvalho (2010).

As ondas são classificadas segundo sua frequência como: infrassons (abaixo de 20 Hz), que não são perceptíveis ao ouvido humano; ondas de baixas frequências que são os sons mais graves (20 e 200 Hz); médias frequências que são os sons médios (200 à 2.000 Hz); altas frequências que são os sons agudos (de 2.000 à 20.000 Hz) e os ultrassons (acima de 20.000 Hz) que também não são perceptíveis ao ouvido humano. Para os seres humanos a faixa de maior percepção auditiva fica entre 1.000 e 4.000 Hz, porém outros animais são capazes de ouvirem os infrassons e ultrassons (MURGEL, 2007).

A propagação do som ocorre em todas as direções a partir da fonte emitente, e com o distanciamento da fonte, perde energia diminuindo sua intensidade. Para uma maior velocidade de propagação do som é necessário que o meio onde o som está sendo propagado seja elástico (MURGEL, 2007), pois, a vibração transmitida pelas moléculas do meio é mais eficiente se o material for denso, ou seja, quanto mais denso, maior será a velocidade da propagação. A

velocidade do som também é influenciada pela temperatura e umidade do meio, porém, a pressão atmosférica ou frequência não altera a velocidade de propagação. O ar, não é um meio perfeitamente elástico, então a propagação do som a 20° C é de 343 m/s, considerada baixa em relação a materiais mais densos como o ferro, onde a velocidade de propagação é de 5.200 m/s (CARVALHO, 2010).

3.8.2 O ruído

Para Murgel (2007) o som é qualquer vibração com frequência dentro da faixa audível pelo ser humano. Já o ruído é uma superposição de numerosas vibrações de frequências diversas, não harmônicas entre si, ou todo som que não pode ser codificado com algum significado. Para medir os níveis de ruídos, é utilizado o Decibel (dB), que é a décima parte de um bel, unidade que recebe esse nome em homenagem a Alexander Graham Bell.

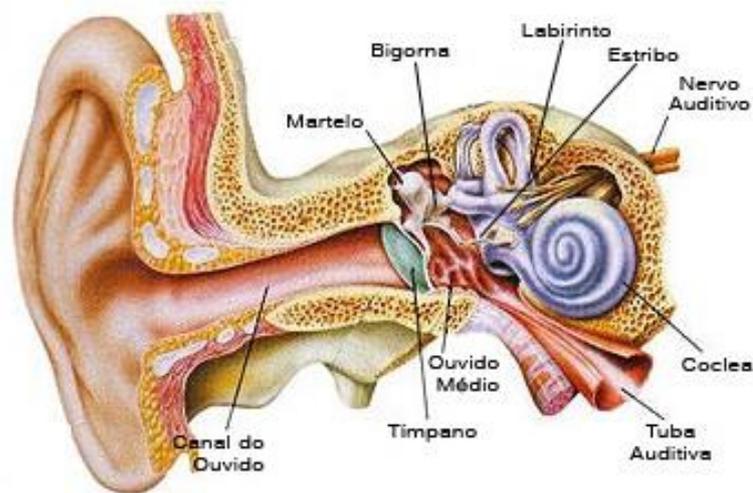
Mas, caracterizar um som como ruído é bastante subjetivo, pois, o que para alguns indivíduos é música, para outros, pode ser um conjunto de sons desagradáveis. Porém há certas fontes sonoras que são indiscutivelmente causadoras de ruídos, como o tráfego de automóveis, máquinas em uma indústria, e até mesmo os equipamentos mais sutis como aparelhos eletrodomésticos.

Em uma edificação, o ruído é resultante da atividade humana como pessoas conversando, animais, máquinas e equipamentos em funcionamento entre outras fontes geradoras. Atualmente acredita-se que a frequência de um determinado som pode ser mais importante que sua intensidade quando se avalia os efeitos nocivos à saúde (CARVALHO, 2010).

3.8.3 Os efeitos do ruído à saúde

A exposição excessiva e frequente a ruídos causam comprovadamente danos à saúde desde a surdez temporária e até mesmo a perda de audição permanente, isto porque as vibrações sonoras são captadas pelo pavilhão auricular e são conduzidas pelo canal auditivo até ao tímpano. O tímpano por sua vez é excitado pela vibração sonora, transformando-a em vibração mecânica que são transportadas pelos ossículos situados no ouvido médio: martelo, bigorna e estribo ampliando as vibrações (MURGEL, 2007) (Figura 9).

Figura 9: Pavilhão auditivo.



Fonte: <http://www.infoescola.com>.

Acesso em 28/08/2019.

Na parte interna do ouvido estão situados: o vestíbulo, os canais semicirculares e a cóclea formando um sistema de canais cheios de líquido, que recebem as vibrações mecânicas e as transforma em sinais nervosos pelas células ciliares situadas no órgão de Corti sendo transmitidos ao cérebro pelo nervo auditivo (BISTAFA, 2011).

Com o passar dos anos, devido a longo período de exposição aos diversos ruídos, as células ciliares ficam danificadas, causando a perda auditiva (MURGEL, 2007).

Porém, os malefícios decorrentes do excesso de ruído não se limitam apenas à perda auditiva. Pesquisas comprovam que a exposição de um indivíduo aos mais variados níveis de intensidade e frequência de ruídos ocasionam transtornos neuropsíquicos (BISTAFA, 2011).

A audição é um dos principais meios de defesa do organismo. Embora o indivíduo esteja em repouso, seu estado muda para alerta assim que o sistema auditivo capta um som de maior intensidade, fazendo com que o organismo reaja instintivamente aumentando a oxigenação cerebral, os batimentos cardíacos, frequência respiratória e a produção de hormônios como a adrenalina e noradrenalina, além de contrações musculares do sistema digestivo (MURGEL, 2007).

Essa reação de autodefesa involuntária e por vezes imperceptível no cotidiano gera um grande desgaste ao organismo, fazendo com que o indivíduo apresente quadros de stress, irritabilidade, insônia, falta de concentração, alterações cardiocirculatórias e gastrointestinais entre outros problemas de saúde (BISTAFA, 2011). A Figura 10 ilustra níveis de ruídos e o efeito causado ao ouvido humano.

Figura 10: Níveis de ruído e seus efeitos aos ouvidos humanos.

Níveis de Ruído em dBA				
Repousante 0 dBA dormitório 35 dBA	Incomodativo 50 dBA trânsito 70 dBA	Fatigante 80 dBA indústria 85 dBA	Perigoso 100 dBA britadeira 115 dBA	Lesivo 120 dBA avião a jato 135 dBA

Fonte: SIMÕES, 2011.

Diante dos efeitos nocivos que o desconforto acústico ocasiona, os estudos relacionados a mitigar os níveis de ruído tem se voltado para solucionar os problemas nos ambientes cotidianos da atividade humana (CARVALHO, 2010).

Para determinar as melhores maneiras de criar um ambiente confortável, é necessário classificar os ruídos que incidem sobre a edificação e aplicar o tratamento acústico mais adequado.

3.9 CLASSIFICAÇÃO DOS RUÍDOS QUANTO SUA TRANSMISSÃO

3.9.1 Ruídos aéreos

A NBR 15575-3:2013 define os ruídos aéreos como sendo aqueles produzidos e propagados pelo ar, como vozes por exemplo. Já os ruídos de impacto são aqueles produzidos por percussão sobre um corpo sólido e propagados pelo ar como queda de objetos ou passos sobre a laje.

Segundo Bistafa (2011) a propagação das ondas sonoras em ambiente aberto ocorre de forma livre sem interferência de outras ondas. O som emitido inicialmente a um nível elevado é atenuado de acordo com a distância entre a fonte emissora e seu receptor. Uma vez emitido o som, este, penetra nas edificações por aberturas como janelas e portas, ou elementos divisórios, como através das paredes de alvenaria (Figura 11).

Figura 11: Representação dos ruídos aéreos.



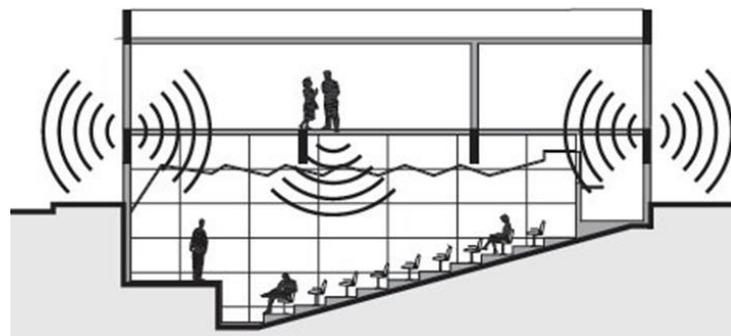
Fonte: <https://dbcover.com> - Acesso: 05/09/2019

3.9.2 Ruídos de impacto

Por sua vez, o ruído de impacto é gerado pela vibração de um corpo sólido que recebe uma excitação localizada. A energia gerada com o impacto é irradiada por todas as direções no ambiente com movimentos ondulatórios em diversas faixas de frequência (MURGEL, 2007).

Com o impacto, as ondas vibratórias são transmitidas pelo ar promovendo a vibração de toda a estrutura do ambiente gerando fontes secundárias de ruído, como ilustra a Figura 12. A velocidade da transmissão das ondas é influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas das superfícies impactadas (CARVALHO, 2010).

Figura 12: Representação dos ruídos de impacto.



Fonte: CARVALHO (2010).

3.10 COMPORTAMENTO DAS ONDAS SONORAS

O som, quando incide em uma superfície sólida, apresenta comportamentos distintos, uma parte da energia sonora é refletida pelo obstáculo, outra parte é transmitida e outra parte da energia sonora é dissipada pelo material (Figura 13) definindo-o como refletor, absorvente ou transmissor. Essas reações dependem da espessura do obstáculo e das características físicas e mecânicas de cada material.

Figura 13: Comportamento da onda sonora diante de uma barreira.



Fonte: CARVALHO (2010).

Isolamento acústico é a capacidade que um material tem de impedir que o som ultrapasse de um ambiente para outro. Materiais densos são melhores isolantes acústicos, pois o som incidente sobre sua superfície é, em grande parte, refletido para o ambiente em que foi gerado. Enquanto, absorção acústica é a capacidade de um material transformar a energia sonora em energia térmica (CARVALHO, 2010). Essa capacidade é mais eficaz em materiais fibrosos ou porosos, uma vez que, as partículas de ar se movimentam no interior do material fazendo com que a energia seja dissipada por atrito. Segundo BISTAFA (2011), a propriedade fundamental para os materiais absorventes é a resistência ótima ao fluxo de ar através do material.

3.10.1 As ondas sonoras em estruturas de concreto

Um concreto composto de areia e agregados britados tem densidade na ordem de 2.400 kg/m^3 (METHA, MONTEIRO, 2014). Portanto é um bom isolante de sons oriundos do ambiente externo, pois o som é, em grande parte, refletido. Porém quando a fonte geradora se encontra dentro do ambiente ocorre um fenômeno chamado reverberação que é o prolongamento do som, prejudicando a inteligibilidade e causando um grande desconforto.

Para minimizar os efeitos negativos que os ruídos provocam nos usuários de uma edificação, a ABNT NBR 15575:2013 determina que, estas devam apresentar desempenho acústico adequado as suas funções indicando sistemas de isolamento compostos por camadas distintas de materiais, capazes de promover melhor desempenho acústico em pisos e vedações verticais, minimizando os níveis de ruídos aéreos e de impacto.

Materiais porosos absorvem a maior parte da energia, fazendo com que a onda sonora seja dissipada dentro da estrutura. Sendo assim, diversos pesquisadores têm incorporado borracha reciclada de pneus inservíveis a fim de diminuir a densidade do concreto e torná-lo mais poroso (YOUSSFA et al., 2017). Compósitos de cimento emborrachados apresentam um bom desempenho acústico devido à porosidade e baixa densidade de massa.

O uso de resíduos de borracha em concreto, segundo Holmes et al. (2014), aumenta a ductilidade do concreto favorecendo em até 90% a dissipação da energia sonora quando comparado ao concreto convencional.

Ghizdăvet et al. (2016) estudaram o comportamento acústico de concretos emborrachados nas porcentagens de 0%, 5% e 7,5%, em massa, em relação a areia, utilizando o método do interferômetro acústico que consiste em dois microfones, um gerador de sinal, um amplificador e um computador com controle e aquisição de dados. Os valores do coeficiente de absorção sonora das amostras de controle variaram de 0,22 a 0,37 (dB/mm), enquanto as amostras com borracha apresentaram valores de coeficiente de absorção entre 0,52 e 0,93 (dB/mm). As análises concluíram que todas as amostras de concretos emborrachados apresentaram resultados aceitáveis em frequências acima de 700Hz.

Guo et al. (2017) utilizaram o método do ultrassom para avaliar a velocidade da propagação de ondas em concretos com substituição do agregado por resíduo de borracha e pré-tratamento superficial com NaOH. Com os resultados

obtidos nos ensaios puderam determinar a atenuação acústica das amostras, e constataram que os valores de atenuação aumentaram de acordo com a crescente substituição do agregado pelo resíduo de borracha, melhorando o efeito de isolamento acústico.

Medina et al. (2017) estudaram as propriedades acústicas do concreto leve em tubo de impedância, contendo alto teor de borracha de 0% a 100% de substituição do agregado graúdo por fibras têxteis e fibras de aço revestidas de borracha denominadas FCR e por borracha trituradas denominadas CR. Os resultados indicaram que as amostras contendo fibras (FCR) obtiveram maiores índices de absorção acústica ao serem comparadas às amostras contendo somente borracha triturada. Em ambas as amostras os resultados se mostraram mais significativos em altas frequências. Avaliaram também, em câmara reverberante, painéis de concreto contendo FCR e CR com diferentes texturas. Concluíram que as placas com superfície lisa e 80% de substituição do agregado por FCR atingiram 33% de absorção sonora nas frequências entre 900 e 1000 Hz e com substituição de 100% do agregado alcançaram até 48,6% de absorção. As placas com acabamento rugoso apresentaram comportamento semelhante.

Silva et al. (2018) estudaram argamassa contendo sílica ativa e resíduo de borracha nos teores de 25% e 30% em substituição ao agregado miúdo. Constataram uma diminuição nas resistências mecânicas, porém, em relação às propriedades acústicas a borracha proporcionou melhorias às argamassas, apresentando um aumento na atenuação e diminuição na velocidade de propagação das ondas-P.

Angelin (2018) estudou as propriedades acústicas de concreto leve autoadensável emborrachado e constatou que o método do tubo de impedância não é o mais adequado para avaliar a capacidade de absorção do som, pois apesar do concreto com borracha ser um material poroso, os resultados obtidos são muito divergentes.

Si et al. (2018) estudaram o desempenho do concreto autoadensável com 15% de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha sem tratamento superficial e 15% e 25% com tratamento superficial com solução de NaOH. Utilizando o método do ultrassom com frequência sonora de 500 KHz constataram que a velocidade de transmissão sonora foi de 4006 m/s para as amostras de 15% sem tratamento e 25% com tratamento. Já as amostras com 15% de substituição

com tratamento apresentaram velocidade de transmissão de 4037 m/s e as amostras de controle apresentaram velocidade de 4308 m/s. Embora as amostras contendo 15% de resíduo tratado superficialmente com NaOH tenham apresentado valores maiores na velocidade da transmissão sonora, ainda causam um efeito positivo na transmissão ultrassônica no concreto.

Para a avaliação das características acústicas das argamassas emborrachadas, optou-se neste trabalho, utilizar o aparelho de ultrassom para determinar a atenuação das ondas sonoras na frequência de 1000 Hz, uma vez que, em componentes cimentícios esta frequência apresenta resultados mais expressivos.

3.11 CONFORTO TÉRMICO NAS EDIFICAÇÕES

Conforto térmico pode ser definido como a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente, ou seja, quando a densidade do fluxo de calor entre o corpo humano e o ambiente é igual à taxa metabólica do corpo, mantendo constante a temperatura corporal (ABNT NBR 15220-1, 2005).

As propriedades dos materiais e componentes de uma edificação definem os parâmetros relacionados aos processos e troca de calor entre a edificação e o ambiente externo. A insolação, ventilação, inércia térmica, as condições climáticas da região, o entorno e as atividades previstas são fatores a serem considerados para atingir as condições de conforto térmico desejadas (CINTRA, 2013).

Segundo a ABNT NBR 15220-3:2005, a forma, a orientação e a implantação da edificação e a correta orientação de superfícies envidraçadas, influenciam diretamente no conforto térmico das edificações. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.

A construção civil é um dos setores mais representativos na economia e um dos que mais consomem energia. Portanto um dos grandes desafios da atualidade é a conciliação entre o desenvolvimento econômico e a minimização do consumo energético (OKTAY et al., 2015).

O conforto térmico nos ambientes é um fator a ser considerado na fase projetual de uma edificação, como forma de se evitar desperdícios ou novos investimentos em sistemas de climatização. Um ambiente agradável reflete em uma melhor qualidade de vida, pois é importante para a saúde e bem estar dos usuários que os níveis de conforto ambiental sejam alcançados, ou seja, quando um conjunto de condições térmicas, acústicas, de umidade ou iluminação são favoráveis para o desenvolvimento das atividades humanas (CINTRA, 2013).

A condutividade térmica dos materiais está diretamente relacionada a sua densidade de massa, quanto menor a densidade, menor será a sua condutividade térmica. A ABNT NBR 15220-3:2005 estabelece parâmetros e diretrizes para a construção de edificações ambientalmente mais confortáveis e apresenta alguns dos principais componentes construtivos e suas respectivas densidades e condutividade térmica (Tabela 9).

Tabela 9: Condutividade térmica de alguns componentes construtivos.

Material	Densidade ρ (kg/m³)	Condutividade Térmica λ(W/(m.K))
Argamassa Comum	1800-2100	1,15
Tijolos e Telhas de Barro	1000-1300	0,70
Placas de Fibro-Cimento	1800-2200	0,95
Concreto Normal	2200-2400	1,75
Concreto com Vermiculite	600-800	0,31
Lã de rocha	20-200	0,045
Lã de vidro	10-100	0,045
Poliestireno Expandido	15-35	0,040
Aglomerado de Fibras de Madeira (Denso)	850-1000	0,20
Aço, Ferro Fundido	7800	55
Granito	2300-2900	3,00
Borrachas Sintéticas	900-1700	0,40

Fonte: ABNT NBR 15220-3:2005.

As construções devem ser projetadas levando em consideração os materiais de construção, revestimentos e acabamentos que sejam termicamente favoráveis ao conforto térmico, evitando assim um maior consumo energético, uma vez que, a temperatura afeta a concentração, produtividade e a qualidade de vida do usuário (CINTRA, 2013).

A condutividade térmica de compósitos cimentícios pode ser reduzida através da incorporação de ar às misturas ou através de agregados leves. Esses agregados leves podem ser naturais ou sintéticos ou também polímeros como derivados de madeira, poliestireno expandido ou borracha (MEDINA et al., 2017).

Em relação à condutividade térmica, diversos autores estudaram as características de compósitos cimentícios emborrachados, e constataram uma diminuição significativa da transmissão de calor, quando comparados aos compósitos convencionais.

Guo et al. (2017) avaliaram a condutividade térmica utilizando o método de geração de calor por linha transitória em concretos com diversos tratamentos superficiais das fibras de borracha. As amostras foram elaboradas utilizando 15%, 25%, 35% e 50% de substituição, e obtiveram taxas decrescentes de 16,28%, 25,58%, 32,95% e 41,09%, respectivamente. Porém, não identificaram diferenças significativas para as formas de tratamento da borracha.

Angelin (2018) constatou um aumento na resistência térmica em concretos autoadensáveis emborrachados e diminuição da condutividade térmica. A baixa condutividade térmica está relacionada a menor massa específica obtida em concretos com adição de borracha e ao aumento do teor de ar causado pelas partículas de borracha durante a mistura.

Conforme Záleská et al. (2019), agregados a base de borracha podem ser utilizados para a redução da condutividade térmica dos materiais utilizados na construção das edificações, contribuindo significativamente para um melhor desempenho térmico. Em seus estudos, realizaram testes de desempenho térmico utilizando um equipamento de transferência térmica em concretos emborrachados. O grau de saturação do concreto tem um efeito significativo nas propriedades térmicas, devido à presença de água que acelera o transporte de calor (por isso, a medição da condutividade térmica foi realizada a partir do estado seco a totalmente saturados). Os pesquisadores relataram a redução de até 70% da condutividade térmica para concretos com 30% de substituição.

Diante do exposto, analisar a capacidade de condutividade térmica das argamassas contribui para uma melhor compreensão a respeito de suas características, objetivando sua aplicação em paredes e tetos para um melhor desempenho das edificações como um todo.

4 SELEÇÃO DOS MATERIAIS E METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho consiste no estudo de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, onde foi substituído o agregado miúdo por fibras de borracha, derivadas da indústria de recauchutagem de pneus, de modo a analisar suas características físicas, mecânicas, desempenho térmico e acústico. Os ensaios de caracterização física dos materiais, a elaboração das argamassas e os ensaios nos estados fresco e endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais da Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, na cidade de Limeira – SP. Para o desenvolvimento do estudo foram seguidas as normas da ABNT, tanto para a caracterização dos materiais, elaboração das argamassas e realização dos demais ensaios, tais como: índice de consistência, retenção de água, determinação do teor de ar incorporado, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, densidade de massa aparente no estado endurecido e determinação de água por capilaridade. Os materiais utilizados foram os seguintes: cimento Portland CPV, agregado miúdo, fibras de borracha e água.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland CPV. Adotou-se este produto por possuir menos adições e segundo Carasek (2010), este tipo de cimento proporciona maiores resistências de aderência principalmente nas idades iniciais devido à finura de seus grãos além da argamassa adquirir alta resistência inicial (Tabela 10).

Tabela 10: Características mecânicas do Cimento Portland CPV.

Características e Propriedades	Unidade	Valor
Tempo de Pega (ABNT NBR 16607:2018)	Início (min.)	130
	Fim (min.)	210
Resistência à Compressão (ABNT NBR 7215:2019)	01 dia MPa	27,50
	03 dias MPa	42,30
	07 dias MPa	48,80
	28 dias MPa	56,00

Fonte: Valores fornecidos pelo fabricante.

4.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na argamassa é do tipo quartzoso, proveniente da região de Corumbataí SP. Para a elaboração dos corpos de provas, o agregado miúdo foi passado pela peneira de malha 6,3 mm para a retirada de folhas ou possíveis impurezas, em seguida foi submetido ao processo de secagem em estufa com temperatura de 105°C por 24 horas para a retirada de toda umidade, após o esfriamento o agregado foi armazenado em um recipiente completamente vedado.

4.1.3 Resíduo de Borracha

Os resíduos de borracha vulcanizada são provenientes da indústria de recauchutagem de pneus, obtidos por processo de raspagem mecânica (Figura 14).

Figura 14: Processo de raspagem para recauchutagem de pneus.



Após o processo de raspagem, os resíduos de borracha apresentam formas e dimensões variadas. Para este trabalho, o material foi selecionado por peneiramento. Foi utilizado somente o resíduo que passou pela malha 1,20 mm e que ficou retido na malha 0,60 mm (Figuras 15 e 16).

Figura 15: Aspecto visual do resíduo.



Figura 16: Aspecto visual do resíduo.



4.1.4 Água

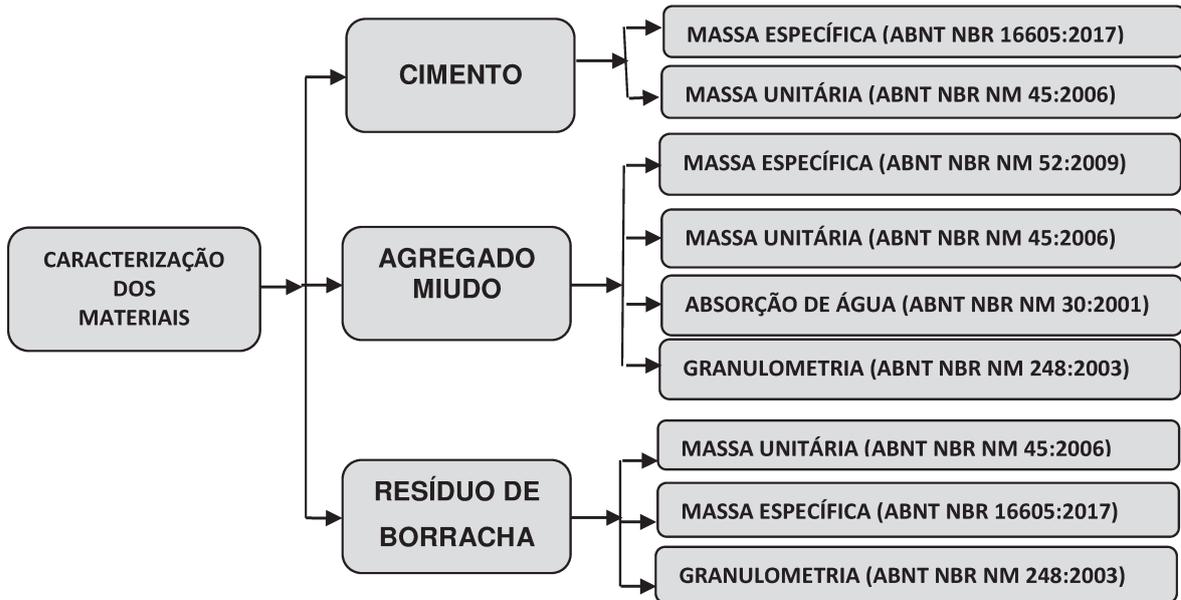
A água utilizada foi fornecida pela concessionária responsável pelo abastecimento de água da cidade de Limeira.

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA

4.2.1 Caracterização física dos materiais

Os ensaios realizados para a caracterização física dos materiais empregados nesta pesquisa estão indicados na Figura 17.

Figura 17: Ensaios realizados para a caracterização física dos materiais.



4.2.1.1 Massa Específica e Massa Específica Aparente da Areia

Os ensaios para determinar a massa específica e a massa específica aparente da areia foram realizados conforme os métodos padronizados pela ABNT NBR NM 52:2009.

A massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis e foi determinada pela equação 1.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

d_1 = Massa Específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

V = Volume do frasco (cm^3);

V_a = Volume de água adicionada ao frasco (cm^3).

O volume de água adicionado foi determinado conforma equação 2.

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

m_1 = Massa do conjunto (frasco + agregado), (g);

m_2 = Massa total (frasco + agregado + água), (g);

ρ_a = Massa específica da água (g/cm^3).

A massa específica do agregado saturado superfície seca foi determinada, segundo a ABNT NBR NM 52, pela equação 3.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

d_2 = Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s = Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = Volume do frasco (cm^3);

V_a = Volume de água adicionada ao frasco (cm^3)

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Os resultados em duas amostras, segundo a ABNT NBR NM 52:2009 para o mesmo ensaio, não deve diferir mais de 0,02 g/cm^3 , e foi determinada pela equação 4.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

d_3 = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

V = Volume do frasco (cm^3);

V_a = Volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_s = Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

ρ_a = Massa específica da água (g/cm^3).

4.2.1.2 Determinação da Absorção da Areia

A absorção é definida pela ABNT NBR NM 30:2001 como o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. O ensaio para determinar a absorção da areia foi realizado conforme as especificações da norma e foi determinada conforme a equação 5.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

A= absorção de água (%);

ms= massa amostra na condição saturado superfície seca (g);

m = massa da amostra seca em estufa (g).

4.2.1.3 Granulometria da Areia

Para a análise granulométrica do agregado miúdo, foi realizado o ensaio de peneiramento utilizando o conjunto de peneiras de série normal com abertura de malhas de 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,18mm, 2,36 mm e 4,75 mm, seguindo as determinações da ABNT NBR NM 248:2003.

4.2.1.4 Granulometria do resíduo de borracha

Por não possuir uma norma específica para a determinação granulométrica do resíduo de borracha, o ensaio foi realizado conforme as especificações da ABNT NBR NM 248:2003 (adaptada). Devido a massa específica da borracha ser menor que a da areia, e, para não prejudicar a distribuição dos grãos sobre as peneiras, foi usado uma quantidade em massa menor que a especificada na norma, ou seja, duas amostras de 50g cada. Neste ensaio, também foi determinada a dimensão máxima característica e seu módulo de finura.

4.2.1.5 Massa unitária e volume de vazios do agregado miúdo e do resíduo de borracha

A massa unitária pode ser definida como a massa por unidade de volume aparente. Com sua determinação é possível quantificar os materiais em massa, considerando a quantidade de argamassa em volume.

Para determinar a massa unitária da areia e do resíduo de borracha, o ensaio seguiu as especificações da ABNT NBR NM 45:2006.

Assim, com a relação massa/volume foi obtida a massa unitária pela média dos três ensaios conforme equação 6.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

ρ_{ap} = Massa unitária do agregado (kg/m^3);

m_{ar} = Massa do recipiente mais o agregado(kg);

m_r = Massa do recipiente vazio(kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

Para calcular o índice do volume de vazios da areia e do resíduo de borracha, foi utilizada a equação 7.

$$E_v = \frac{100[(d_1\rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1\rho_w} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

E_v = Índice de volume de vazios nos agregados (%);

d_1 = Massa específica relativa do agregado seco (kg/m^3);

ρ_w = Massa específica de água (kg/m^3);

ρ_{ap} = Massa unitária média do agregado (kg/m^3).

4.2.1.6 Massa específica do resíduo de borracha

Para determinar a massa específica do resíduo de borracha foi realizado o ensaio especificado pela ABNT NBR 16605:2017(adaptada). Este ensaio consistiu em colocar álcool 70% dentro de um frasco denominado Le Chatelier até a marca de

300 cm³, deixado em repouso por 30 minutos. Em seguida, foi colocado 300 g de resíduo borracha seco e efetuados movimentos circulares até que bolhas de ar não subissem mais até a superfície do líquido. Foi anotado o deslocamento do nível do líquido no tubo graduado.

Com estes dados determinou-se a massa específica aparente através da relação entre a massa do material seco e o volume do líquido deslocado conforme equação 8.

$$\rho_{\text{borracha}} = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo:

ρ = Massa específica do material ensaiado (g/cm³);

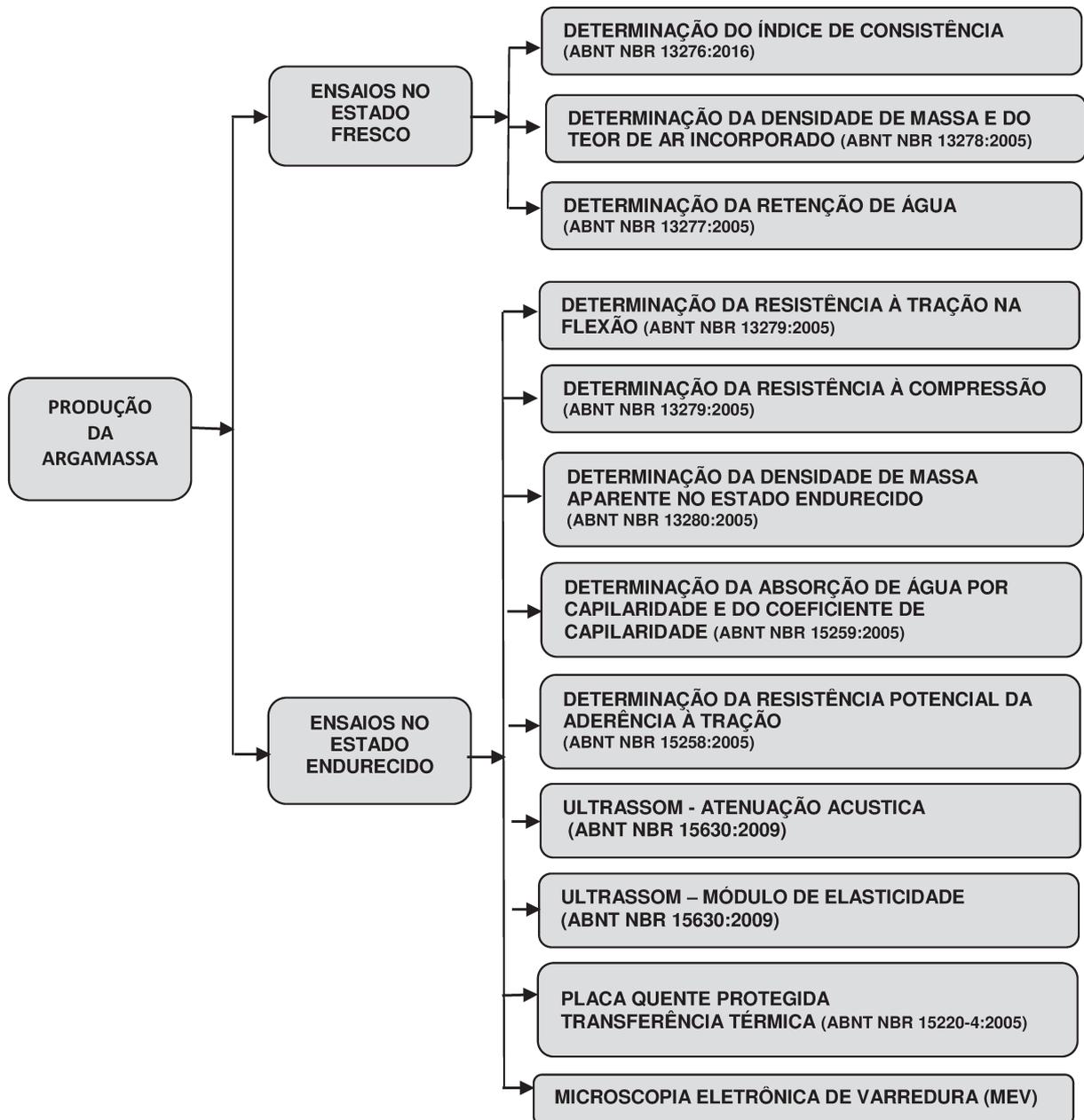
m = Massa do resíduo de borracha (g);

V = Volume deslocado pela massa do resíduo de borracha corrigido (cm³);

4.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A ABNT NBR 13281:2005 determina os requisitos que as argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos devem atender. Na Figura 18 estão listados os ensaios realizados no estado fresco e endurecido das argamassas.

Figura 18: Ensaios realizados no estado fresco e endurecido das argamassas.



4.3.1 Composição das Argamassas

Foram produzidos num total de 5 composições de argamassas, sendo uma de referência (CP00) e outras quatro com os seguintes teores de substituição da areia pelos resíduos de borracha: 5% (CP05), 10% (CP10), 15% (CP15) e 20% (CP20).

Para a produção da argamassa de referência, foi utilizado o traço em massa 1:3 (cimento:areia), sem aditivos ou adições minerais.

A quantidade dos materiais utilizados para produzir seis litros de argamassa está na Tabela 11.

Tabela 11: Composição das argamassas.

Composição das Argamassas (g)					
Argamassas	Cimento	Areia	Borracha	Água	A/C
CP00	3110	9330	0	1980	0,64
CP05	3110	8860	202	1950	0,63
CP10	3110	8397	405	1950	0,63
CP15	3110	7931	607	1980	0,64
CP20	3110	7464	810	1980	0,64

Foram moldados num total de 90 corpos de prova, sendo:

- 18 corpos de prova de referência (CP00);
- 18 corpos de prova com 5% de resíduos de borracha (CP05);
- 18 corpos de prova com 10% de resíduos de borracha (CP10);
- 18 corpos de prova com 15% de resíduos de borracha (CP15);
- 18 corpos de prova com 20% de resíduos de borracha (CP20).

Os materiais componentes das argamassas foram homogeneizados em uma argamassadeira da marca G.Paniz 18C, com capacidade de 18l. Os componentes foram inseridos no recipiente e misturados com a argamassadeira em funcionamento na velocidade baixa por 90s, conforme especificação da norma ABNT NBR 13276:2016. A argamassa permaneceu em repouso por 15 min., decorrido esse tempo, foi efetuada a mistura manual para garantir que todo material fosse incorporado a argamassa.

Após o preparo da mistura, foram moldados os corpos de prova seguindo as especificações da ABNT NBR 13276:2016, utilizando moldes prismáticos com

dimensões de 40 x 40 x 160 mm. O processo de moldagem consistiu em inserir uma porção de argamassa nos moldes metálicos com o auxílio de uma guia e um nivelador, formando uma camada uniforme e aplicar 30 quedas da mesa de adensamento. Em seguida, foi introduzida a segunda camada, até o preenchimento da forma e espalhada uniformemente. Foi aplicada mais 30 quedas da mesa de adensamento, retirada a guia e rasada a argamassa na forma com uma espátula.

Os corpos de provas foram desformados após 24 horas de cura. Decorrido esse período, os corpos de provas foram curados conforme a ABNT NBR 13279:2005 até a data dos ensaios realizados.

4.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

As características da argamassa no estado fresco interferem diretamente em sua resistência, trabalhabilidade e desempenho.

Foram realizados os seguintes ensaios: determinação do índice de consistência ABNT NBR 13276:2016, determinação de retenção de água ABNT NBR 13277:2005, densidade de massa e do teor de ar incorporado ABNT NBR 13278:2005 (Figura 18).

4.4.1 Determinação do Índice de Consistência

Para determinar o índice de consistência da argamassa no estado fresco, foi realizado o ensaio de mesa de consistência (Flow Table), conforme a ABNT NBR 13276:2016.

4.4.2 Determinação da Densidade e do Teor de Ar Incorporado

Após o preparo da argamassa foi realizado o ensaio para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, seguindo as recomendações da ABNT NBR 13278:2005. Este consiste em introduzir porções de argamassa em três camadas aproximadamente iguais em um recipiente calibrado, e em cada camada deve-se aplicar 20 golpes com uma espátula em todo seu perímetro, batendo somente na superfície da camada inferior. Em seguida, aplicar três golpes de queda de aproximadamente três centímetros de altura e rasar o recipiente. Registrar a massa do recipiente com a argamassa.

A densidade de massa da argamassa foi determinada pela equação 9:

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo:

A= Densidade de massa (g/cm³);

Mc = massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa de ensaio(g);

Mv = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

Vr = volume do recipiente cilíndrico (cm³).

O teor de ar incorporado foi determinado pela equação 10:

$$AI = 100 \times \left(1 - \frac{A}{B}\right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Sendo:

AI= Teor de ar incorporado (%);

A = Densidade de massa (g/cm³);

B = Densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios.

A densidade de massa teórica foi determinada pela equação 11:

$$B = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\gamma_i}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo:

Mi = massa seca de cada componente da argamassa, inclusive massa da água (g);

γi = densidade de massa de cada componente da argamassa (g/cm³).

4.4.3 Determinação da Retenção de Água

Este ensaio foi realizado conforme as especificações da ABNT NBR 13277:2005, e consiste em encher um molde metálico de massa conhecida com a argamassa em até dez porções, formando um pequeno excesso, rasar com o auxílio de uma espátula formando um ângulo de 45° de maneira que o excesso de argamassa seja retirado, alisar a superfície e pesar novamente o recipiente. Colocar sobre a argamassa duas telas de gaze e sobre a gaze, colocar 12 filtros secos de

massa conhecida. Sobre o conjunto, colocar o disco rígido e o peso de 2 kg. Após 2 minutos, retirar o peso e registrar a massa dos discos umedecidos.

A retenção de água foi calculada pela equação 12:

$$R_a = \left[1 - \frac{M_f - M_{se}}{AF \times (M_{ma} - M_m)} \right] \quad (\text{Eq. 12})$$

Sendo:

Ra = Retenção de água (%)

Mw = massa total de água acrescentada à mistura (g)

M = Soma das massas dos componentes anidros (g)

AF = Fator água/argamassa fresca, dado pela equação 13:

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (\text{Eq. 13})$$

Sendo:

Mf = massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro(g);

Mse = massa do conjunto de discos secos (g);

Mma = massa do molde com argamassa (g);

Mm = massa do molde vazio (g).

4.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

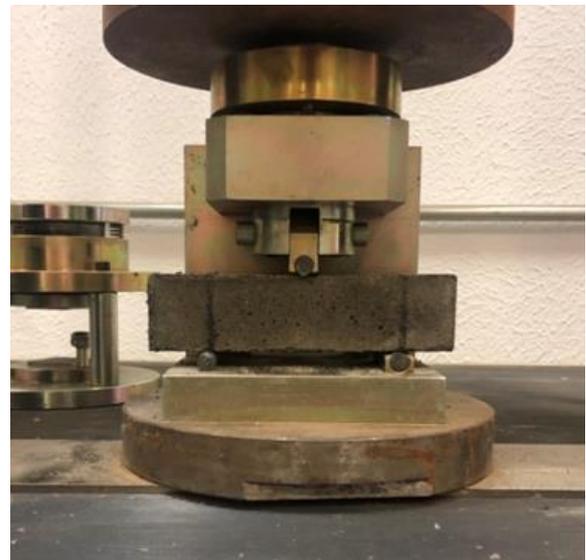
4.5.1 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados segundo os procedimentos da ABNT NBR 13279:2005 nas idades de 7 e 28 dias. Foram produzidos 6 corpos de prova de referência e seis corpos de provas com cada teor de substituição. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da FT em uma prensa eletromecânica da marca MTS, com capacidade de até 300 t (Figuras 19 e 20). Os corpos de prova foram posicionados na prensa e em seguida, foi aplicada no meio do vão uma carga perpendicular de 50 ± 10 N/s até a ruptura do corpo-de-prova.

Figura 19: Equipamento para ensaio de Tração na Flexão.



Figura 20: Ensaio de Tração na Flexão. Um corpo de prova sendo submetido a uma carga perpendicular no meio do vão, causando a ruptura.



A resistência à tração na flexão foi calculada pela equação 14:

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (\text{Eq. 14})$$

Sendo:

R_f = Resistência à tração na flexão (MPa);

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

L = Distância entre os suportes (mm).

4.5.2 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados segundo os procedimentos da ABNT NBR 13279:2005 nas idades de 7 e 28 dias, em uma prensa eletromecânica MTS, com capacidade de até 3000t, calibrada em 06/10/2017 (Figura 21 e 22). Para o ensaio de compressão axial foram rompidos 12 metades dos corpos-de-prova prismáticos para cada teor de substituição.

Figura 21: Equipamento para ensaio de compressão.



Figura 22: Ensaio de Compressão.



A resistência à compressão foi calculada pela equação 15:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Eq. 15})$$

Sendo:

R_c = Resistência à compressão (MPa);

F_c = Carga máxima aplicada (N)

1600 = Área da seção do corpo de prova considerada quadrada (40 mm x 40 mm).

4.5.3 Densidade de massa no estado endurecido

Decorridos 28 dias de cura em solução de água saturada com cal, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e mantidos a temperatura de 23 ± 2 ° C, e umidade relativa do ar 60 ± 5 %, conforme especifica a ABNT NBR 13280:2005. Com o auxílio de um paquímetro a largura e altura de todos os corpos de provas foram tomadas em duas posições diferentes. Em seguida, a massa de cada corpo de prova foi determinada utilizando uma balança de precisão com resolução de 0,1 g.

A densidade de massa foi calculada segundo a equação 16:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m}{v} \times 1000 \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo:

v = Volume calculado segundo a equação $v = l.h.c$;

m = Massa do corpo de prova.

4.5.4 Absorção de água por capilaridade

Para a determinação da absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade foi realizado o ensaio seguindo as determinações da ABNT NBR 15259:2005. Para esse ensaio foram utilizados 6 corpos de prova para cada teor de substituição, totalizando 30 corpos de prova (Figuras 23 e 24).

Figura 23: Ensaio de Absorção por capilaridade.



Figura 24: Corpos de provas após ensaio de capilaridade.



Para a determinação da absorção de água, foi utilizada a equação 17, para cada tempo decorrido.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (\text{Eq. 17})$$

Sendo:

A_t = Absorção por capilaridade para cada tempo (g/cm^2);

m_t = Massa do corpo de prova para cada tempo (g);

t = Tempo de 10 min e 90 min (s);

16 = Área do corpo de provas (cm^2).

O coeficiente de capilaridade por definição segundo a NBR 15259:2005, é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e 90 min, conforme equação 18:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (\text{Eq.18})$$

Onde:

C = Coeficiente de capilaridade

m_{10} = Massa do corpo de prova aos 10 min.

m_{90} = Massa do corpo de prova aos 90 min.

4.5.5 Determinação da resistência potencial da aderência à tração

4.5.5.1 Elaboração do substrato padrão

Para a realização do ensaio de determinação da resistência potencial da aderência à tração (ABNT NBR 13528-2:2019) das argamassas estudadas foram elaboradas 3 placas de concreto para serem utilizadas como substrato padrão atendendo o especificado no Anexo B da ABNT NBR 14081-2:2015. A norma sugere que o traço, em massa, utilizado para a execução do substrato deve ser 1:2,6:1,3 (cimento: areia: agregado graúdo) e relação água/cimento de 0,45 a 0,50.

Para a elaboração dos substratos foi efetuado o ensaio de granulometria da areia e da brita (ABNT NBR NM 248:2003) a fim de certificar-se que estariam dentro das características exigidas na norma. O concreto foi elaborado na argamassadeira utilizando cimento CPV (ABNT NBR 16697:2018). As placas foram moldadas em mesa vibratória utilizando uma malha metálica com espaçadores para garantir que essas ficassem posicionadas no centro do substrato.

Após 24 horas os substratos foram desenformados e imersos em água saturada com cal durante 6 dias. Após esse período estas foram retiradas e concluíram a cura de 28 dias em ambiente aberto e protegido das intempéries (Figuras 25 e 26).

Figura 25: Moldagem do substrato padrão em mesa vibratória.



Figura 26: Substrato padrão após cura de 28 dias.



4.5.5.2 Ensaio para determinação da resistência potencial de aderência à tração

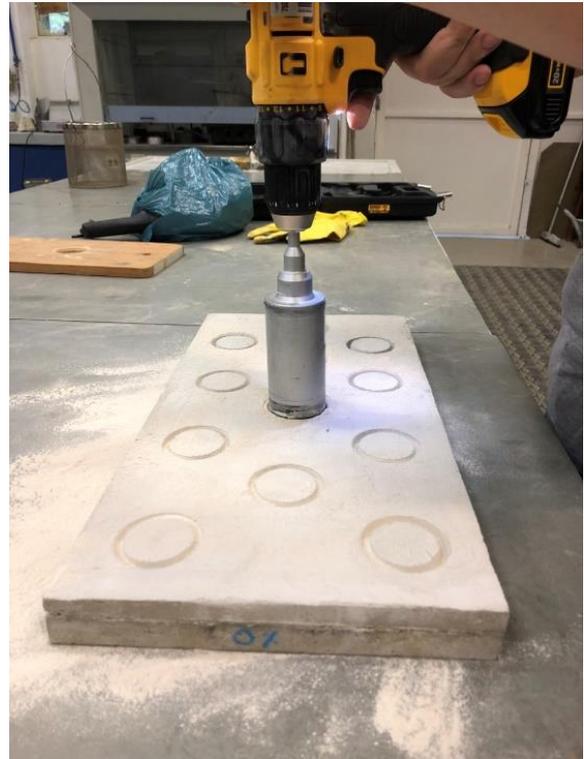
Este ensaio teve como objetivo avaliar a resistência das argamassas submetidas a esforços de tração por arrancamento. Para a execução do ensaio de resistência à tração, foi utilizado um gabarito para garantir que a espessura da argamassa permanecesse uniforme em todo o substrato, conforme determina a ABNT NBR 15258:2005. Após as primeiras 24 horas as argamassas permaneceram na posição horizontal e decorrido esse tempo, completaram a cura de 28 dias nas condições descritas na norma.

Após a cura estar completa, foram efetuados 12 entalhes na argamassa, seguindo as orientações da ABNT NBR 13528-2:2019, utilizando uma furadeira de baixa rotação e uma serra copo. Em seguida, um pincel de cerdas macias foi usado para retirar qualquer tipo de material que pudesse estar solto na superfície e nos vãos dos entalhes. As Figuras 27 e 28 mostram como foi efetuada a aplicação das argamassas no substrato e a execução dos entalhes.

Figura 27: Placa com o gabarito para moldagem das argamassas.



Figura 28: Realização dos entalhes nas argamassas após cura de 28 dias.



Decorridos 3 dias, como determina a norma, 12 pastilhas metálicas com 50 mm de diâmetro foram aplicadas sobre os entalhes utilizando cola epóxi de alta viscosidade. Após 24 horas, para garantir que a cola estivesse completamente seca, o ensaio de arranchamento (Pull-off test) foi realizado, utilizando um dinamômetro (equipamento que aplica uma força contínua de tração perpendicular a pastilha até que ocorra a ruptura). A pastilha metálica possui uma saliência que é encaixada no dispositivo de tração, ao rotacionar, aplica-se a força que é demonstrada na tela do equipamento.

Após a ruptura, registrou-se a força aplicada, o diâmetro e a forma de ruptura das amostras. Nas Figuras 29 e 30 estão representadas as etapas do ensaio da resistência de aderência à tração.

Figura 29: Preparação dos corpos de provas - Colagem das pastilhas.



Figura 30: Execução do ensaio de aderência à tração.



A resistência de aderência à tração em cada amostra foi calculada utilizando a equação 19:

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq.19})$$

Sendo:

R_a = A resistência de aderência à tração (MPa)

F = Força de ruptura (N)

A = Área do corpo de prova (mm²).

4.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância ANOVA foi realizada utilizando o software Action Stat Pro e analisou os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e densidade de massa no estado endurecido das argamassas.

A partir da análise realizada foram selecionados os traços que foram submetidos aos ensaios especiais.

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Instituto de Geociências da UNICAMP (IGE) em Campinas-SP. O microscópio eletrônico utilizado foi o modelo LEO 430i com varredura, fabricado pela Companhia Zeiss. Acoplado a ele há um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da Oxford Instruments para análises químicas semi-quantitativas e um detector de catodoluminescência (Chroma CL) da Gatan. Para a operação, o equipamento foi configurado com energia do feixe de elétrons de 20 kV, corrente do feixe entre 500 pA (imagens) e distância de trabalho 19 mm.

A princípio, para que a visualização no microscópio eletrônico de material não metálico fosse possível, foi necessário metalizar as amostras, a fim de criar condução elétrica. Para realizar esse processo, as amostras foram fixadas em um suporte com uma fita dupla face de carbono e em seguida, um filme também de carbono foi aplicado sobre as amostras, e então estas foram introduzidas na metalizadora da marca Quorum.

Após o processo de metalização das amostras, essas foram fixadas em um suporte e inseridas no compartimento do microscópio eletrônico. Na sequência as imagens foram geradas e captadas utilizando um software específico para esse fim. As Figuras 31 e 32 ilustram a metalizadora e o microscópio que foram utilizados para a microscopia eletrônica de varredura.

Figura 31: Metalizadora.



Figura 32: Microscópio eletrônico de varredura.



4.8 ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de atenuação acústica foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, utilizando o método do ultrassom. O equipamento utilizado para esse ensaio foi o ultrassom da marca Olympus Panametrics, atendendo os procedimentos determinados pela ABNT NBR 15630:2009. Para este ensaio foram testadas seis amostras dos seguintes traços:

- Traço de referência (CP00);
- Traço com 10% de resíduos de borracha (CP10);
- Traço com 20% de resíduos de borracha (CP20).

O ensaio consistiu na utilização de dois transdutores que são acoplados nas extremidades das amostras e com auxílio de gel as ondas sonoras são propagadas nas direções longitudinais e transversais.

Os transdutores são ajustados direcionando as partículas, e, desta forma, se obtém os valores das velocidades de transmissão das ondas de cisalhamento (ondas S) e das ondas de pressão (ondas P).

Antes de iniciar o ensaio, o equipamento foi ajustado, utilizando para isso um modelo padrão, elaborado com resina. O equipamento utilizado, os transdutores, um emissor de ondas e outro receptor foram instalados conforme Figuras 33 e 34.

Figura 33: Equipamento de ultrassom utilizado nos ensaios para determinação da atenuação acústica e módulo de elasticidade dinâmico.



Figura 34: Realização do ensaio de ultrassom.



O coeficiente de atenuação acústica das amostras foi calculado pela equação 20.

$$\alpha = - \frac{20}{h} \log \left(\frac{A_f}{A_i} \right) \quad (\text{Eq. 20})$$

Sendo:

α = Coeficiente de atenuação

A_i = Amplitude inicial

A_f = Amplitude final

h = Altura da amostra

4.9 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Através do ensaio de ultrassom é possível determinar os valores do módulo de elasticidade das argamassas estudadas.

Este ensaio seguiu a ABNT NBR 15630:2008 e foi realizado, aos 28 dias de idade, utilizando 6 corpos de provas prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm, para os traços: de referência (CP00), com 10% de resíduos de borracha (CP10) e com 20% de resíduos de borracha (CP20).

A velocidade de propagação das ondas é dada pela equação 21:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Eq. 21})$$

Sendo:

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/μs)

L = Distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (mm)

t = Tempo registrado pelo equipamento (μs)

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela equação 22:

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Eq.22})$$

Sendo:

E_d = Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)

v = Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (mm/μs)

ρ = Densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m²)

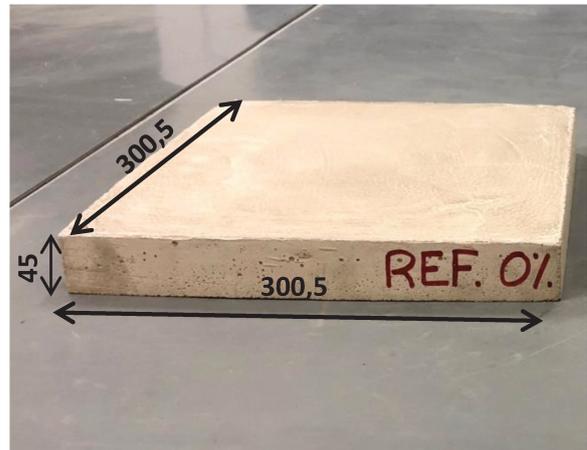
μ = Coeficiente de Poisson (adota-se 0,2)

4.10 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para o ensaio de condutividade térmica foram elaboradas, seguindo as determinações da ABNT NBR 13276:2016, um total de 6 placas de argamassa de dimensões 300,5 mm x 300,5 mm x 45 mm, para os traços: de referência (CP00), com 10% de resíduos de borracha (CP10) e com 20% de resíduos de borracha (CP20).

Nas Figuras 35 e 36 estão o molde e a placa de argamassa utilizada para o ensaio de condutividade térmica (ABNT NBR 15220-4:2005).

Figura 35: Forma para moldagem das placas. Figura 36: Placas para ensaio térmico.



Após 28 dias de cura em câmara úmida, as amostras foram submetidas ao ensaio de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida. Os ensaios para a determinação da condutividade térmica foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal de Itajubá-MG (UNIFEI).

Para a medição da espessura das placas foi utilizado um equipamento de medição por coordenadas tridimensional (Figura 37).

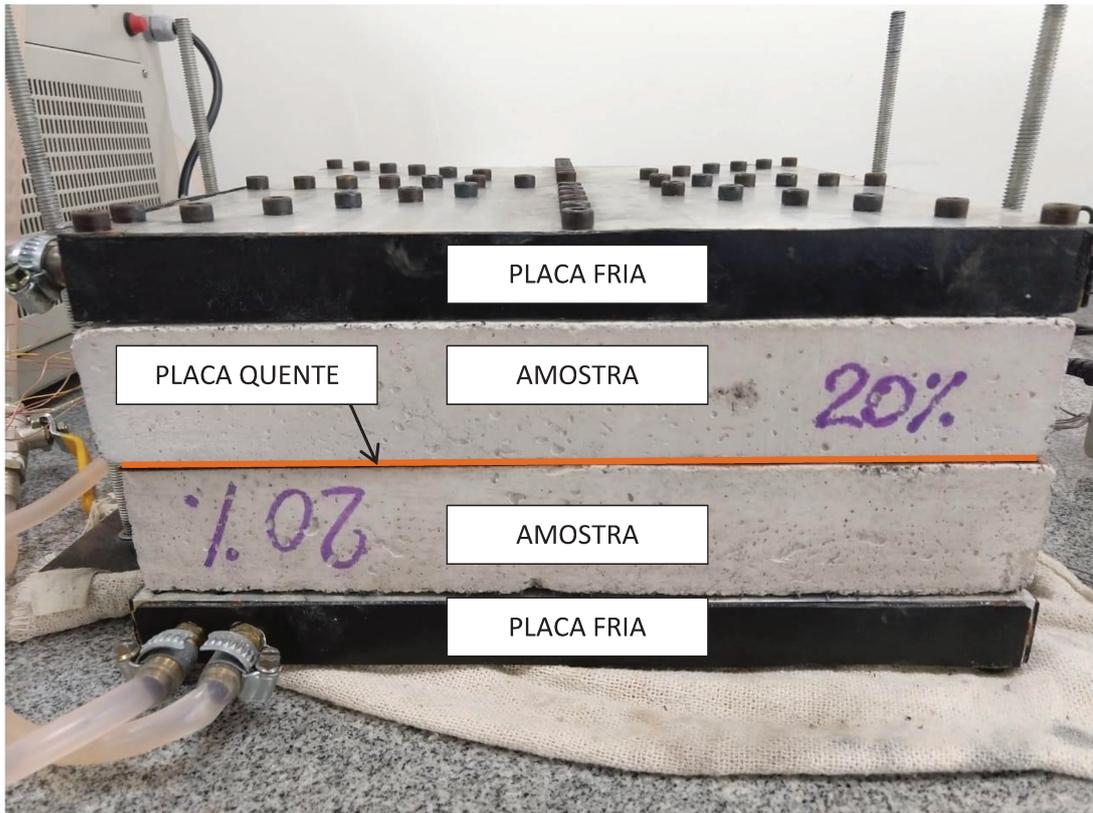
Figura 37: Determinação da espessura das placas para avaliação da condutividade térmica.



A ABNT NBR 15220-4:2005 determina os procedimentos necessários para o ensaio de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida, que consiste em um sistema composto por duas placas frias feitas em alumínio, uma inferior e outra superior, com dimensões de 305 x 305 x 25 mm conectadas por mangueiras a um banho termostatizado da marca Tecnal, modelo TE-184. Por essas placas circula água destilada mantida a 24° C.

Entre estas placas foi instalada uma placa quente feita de kapton com dimensões de 200 x 200 mm, espessura semelhante à de uma folha de papel e resistência de 9,8 Ω , ligada a uma fonte de corrente contínua da marca Instrutemp, modelo ST-305D-II. O anel de guarda, que circunda a placa quente, possui resistência igual a 42,9 Ω e foi também ligado à fonte de corrente contínua Instrutemp ST-305D-II. Na sequência, para que as faces das placas se mantivessem em perfeito contato umas com as outras, são utilizados dois suportes metálicos que estabilizam a estrutura sem pressioná-la. A Figura 38 ilustra o sistema de montagem das placas.

Figura 38: Montagem das placas para o ensaio de condutividade térmica.



Oito termopares do tipo K foram distribuídos nas amostras e na placa quente, e um termopar foi utilizado para monitorar a temperatura ambiente. Os termopares foram conectados ao módulo multiplexador e em seguida ao sistema de aquisição Agilent 34970A onde os dados são coletados e processados por meio de um computador. Após a montagem foram feitos testes com o objetivo de determinar a potência necessária do núcleo para atingir o gradiente térmico desejado.

Os equipamentos utilizados são da marca Keysight e, assim como os termopares, foram calibrados em 12/2018. A bancada experimental está ilustrada na Figura 39.

Figura 39: Bancada experimental da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).



A condutividade térmica foi calculada de acordo com a equação 23.

$$q = -k \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (\text{Eq.23})$$

Onde:

q = Calor

k = Condutividade Térmica do material

A = Área perpendicular ao calor

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ = Gradiente Térmico

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais constituintes da argamassa como o cimento, o agregado miúdo e o resíduo de borracha, assim como, os resultados obtidos nos ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido são apresentados a seguir.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

5.1.1 Cimento Portland CPV

Os resultados da caracterização física do cimento Portland CPV estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Características físicas e mecânicas do CPV.

Características e Propriedades	Resultados	Norma
Massa Específica (g/cm ³)	3,08	ABNT NBR 16605/2017
Massa Unitária (g/cm ³)	1,03	ABNT NBR NM 45/2006

5.1.2 Agregado miúdo

Os resultados das características físicas do agregado miúdo estão indicados na Tabela 13.

Tabela 13: Características físicas da areia.

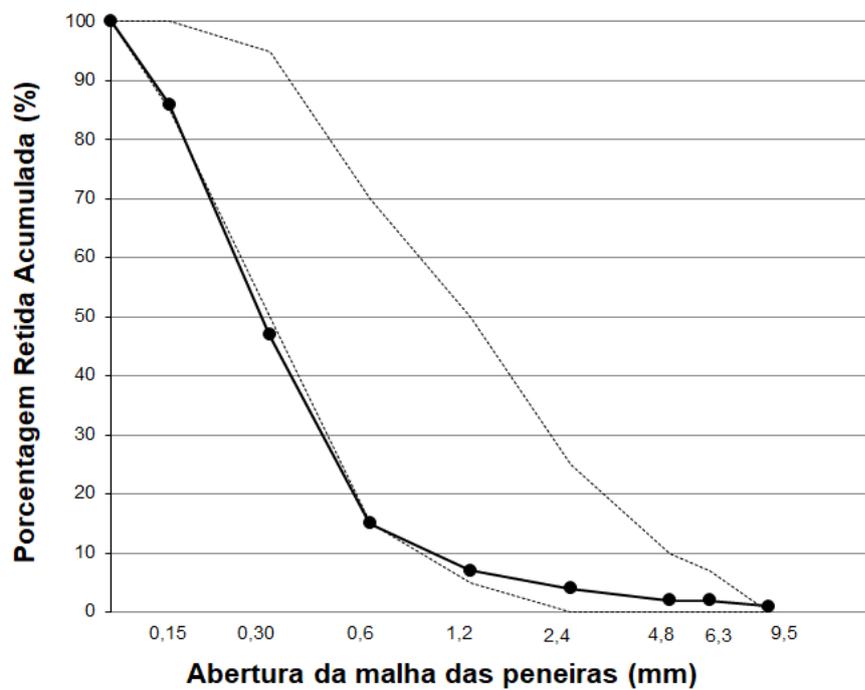
Características e Propriedades	Resultados	Norma
Massa Específica (g/cm ³)	2,64	ABNT NBR NM 52:2009
Massa Unitária (g/cm ³)	1,51	ABNT NBR NM 45:2006
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	1,62	ABNT NBR NM 248:2003

Segundo a ABNT NBR NM 248:2003 o agregado utilizado neste trabalho pertence a zona utilizável inferior (agregado fino), pois seu módulo de finura é inferior à 2,40 mm. O resultado do ensaio está apresentado na Tabela 14 e a curva granulométrica na Figura 40.

Tabela 14: Composição granulométrica da areia natural quartzosa.

Abertura da Peneira (mm)	Areia Natural Quartzosa
	% retida acumulada
9,5	1
6,3	2
4,8	2
2,4	4
1,2	7
0,6	15
0,3	47
0,15	86
Fundo	100

Figura 40: Curva granulométrica da areia natural quartzosa.



5.1.3 Resíduos de borracha

As características físicas da borracha e os ensaios realizados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Características físicas do resíduo de borracha.

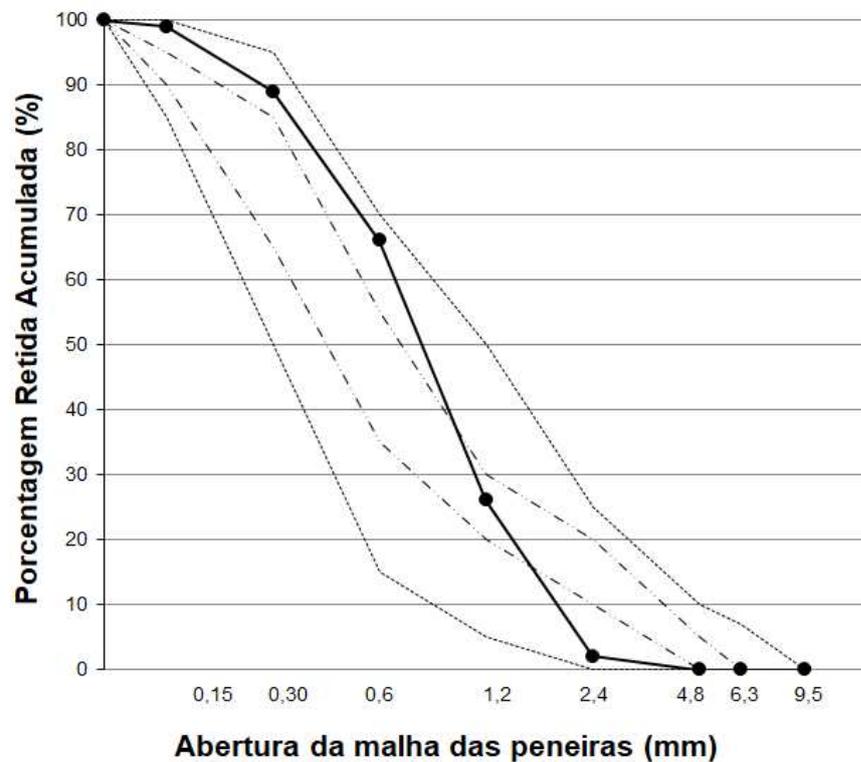
Ensaio Realizado	Resultados	Norma
Massa Específica (g/cm ³)	1,15	NBR 16605:2017
Massa Unitária (g/cm ³)	0,39	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	2,82	NBR NM 248:2003

A granulometria do resíduo de borracha (Tabela 16 e Figura 41) foi determinada seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248:2003 (adaptada) e resultou em um diâmetro máximo de 2,40 mm e módulo de finura em 2,82 mm, pertencente à zona ótima.

Tabela 16: Composição granulométrica do resíduo de borracha.

Abertura da Peneira (mm)	% retida acumulada
12,5	0
9,5	0
6,3	0
4,8	0
2,4	2
1,2	26
0,6	66
0,3	89
0,15	99
Fundo	100

Figura 41: Curva granulométrica da borracha.



5.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A análise das propriedades das argamassas no estado fresco é importante, pois as propriedades como a consistência, retenção de água e teor de ar incorporado interferem na qualidade final do material.

Para obter esses valores foram realizados os seguintes ensaios no estado fresco: índice de consistência, seguindo os procedimentos da ABNT NBR 13276:2016, densidade de massa e teor de ar incorporado conforme ABNT NBR 13278:2005 e retenção de água conforme determina a ABNT NBR 13277:2005. O índice de consistência das argamassas foi fixado em 222 ± 5 mm, variando a relação água/cimento em 0,63 e 0,64.

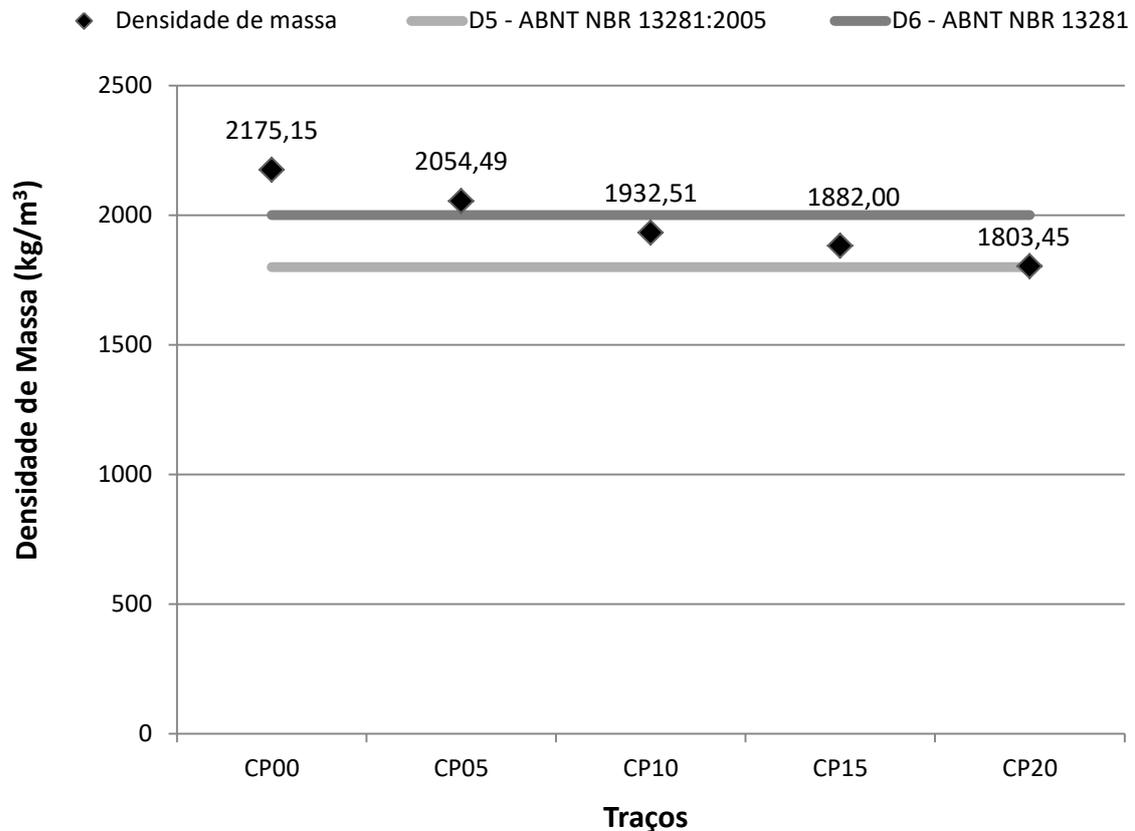
5.2.1 Densidade de Massa no Estado Fresco

As argamassas são classificadas, segundo sua densidade, como leves com densidade de massa menor que 1400 kg/m^3 , normais com densidades de massa entre 1400 e 2300 kg/m^3 e pesadas com densidades acima de 2300 kg/m^3 .

Os valores da densidade de massa, também denominada massa específica das argamassas estudadas apresentaram uma redução em torno de 5% ao serem comparadas entre si, e 17% para o traço com 20% de borracha ao ser comparado com a argamassa de referência, como pode ser observado na Figura 42. Este fato ocorre devido à densidade de massa do resíduo de borracha ser menor que a densidade de massa do agregado natural. O aumento da porosidade observado nas imagens da microscopia eletrônica de varredura, ocasionado pelas bolhas de ar que ficam aprisionadas na matriz cimentícia, também contribuem para a diminuição das densidades das argamassas.

As argamassas estudadas tiveram suas densidades de massa entre $2175,15$ e $1803,45 \text{ kg/m}^3$, sendo classificadas como D6 e D5 respectivamente, conforme a ABNT NBR 13281:2005, sendo consideradas argamassas normais.

Figura 42: Variação da densidade de massa no estado fresco.



5.2.2 Teor de Ar Incorporado

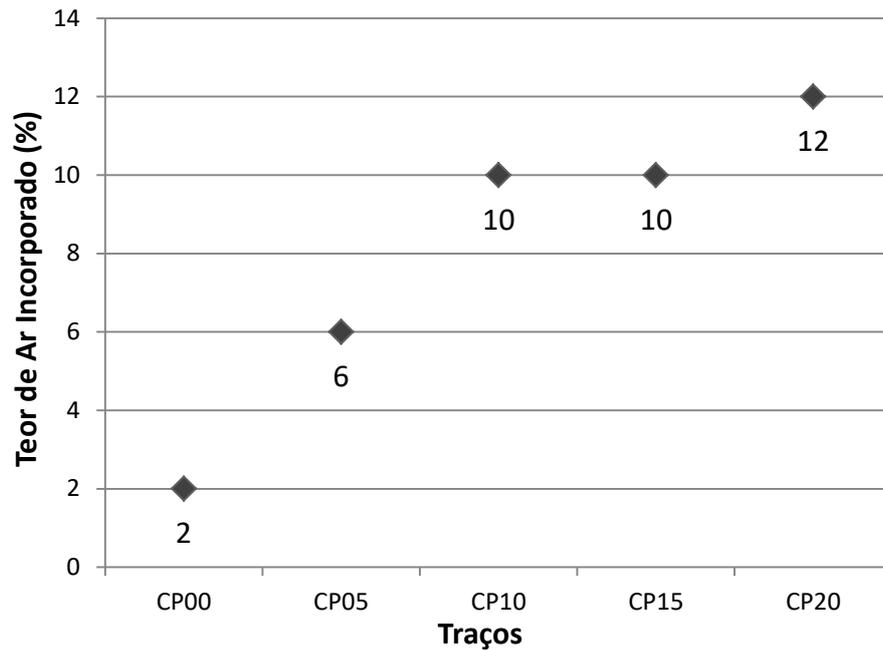
Teor de ar incorporado é a quantidade de ar presente em um determinado volume de argamassa e contribui para a trabalhabilidade da argamassa (ABNT NBR 13278:2005). A Figura 43 demonstra o aumento proporcional do teor de ar incorporado em relação ao aumento de substituição da areia por resíduo de borracha.

As argamassas estudadas apresentaram teores de ar incorporado entre 2 e 12%, ou seja, abaixo de 14%.

Segundo Canova et al. (2015) valores maiores de 16% de teor de ar incorporado na argamassa podem reduzir a resistência de aderência à tração no substrato.

A ASTM C270 (ASTM, 2019) recomenda que o teor máximo de ar incorporado em argamassas seja de 14%.

Figura 43: Variação do teor de ar incorporado.

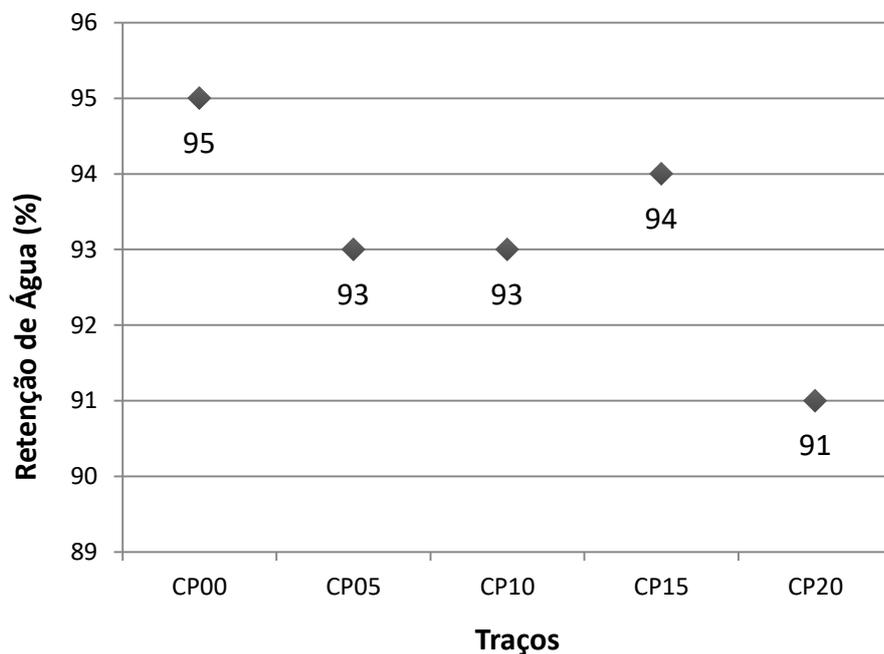


5.2.3 Retenção de Água

A capacidade de retenção de água é uma propriedade que afeta trabalhabilidade e a qualidade da argamassa tanto no estado fresco como endurecido.

Em todas as argamassas estudadas a retenção de água foi superior a 90%, isso indica que argamassas contendo borracha mantêm a sua trabalhabilidade e é classificada como U5 conforme a ABNT NBR 13281:2005 (Figura 44).

Figura 44: Variação da retenção de água.



5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados no estado endurecido das argamassas foram: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido de acordo com a ABNT NBR 13280:2005, determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade seguindo as especificações da ABNT NBR 15259:2005, determinação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão conforme determina a ABNT NBR 13279:2005, determinação da resistência potencial de aderência à tração de acordo com a ABNT NBR 15258:2005, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio de ultrassom para determinação da atenuação acústica e o módulo de elasticidade dinâmico de acordo com a ABNT NBR 15630:2008 e condutividade térmica pelo método da placa quente protegida conforme ABNT NBR 15220-4:2005.

5.3.1 Densidade de Massa no Estado Endurecido

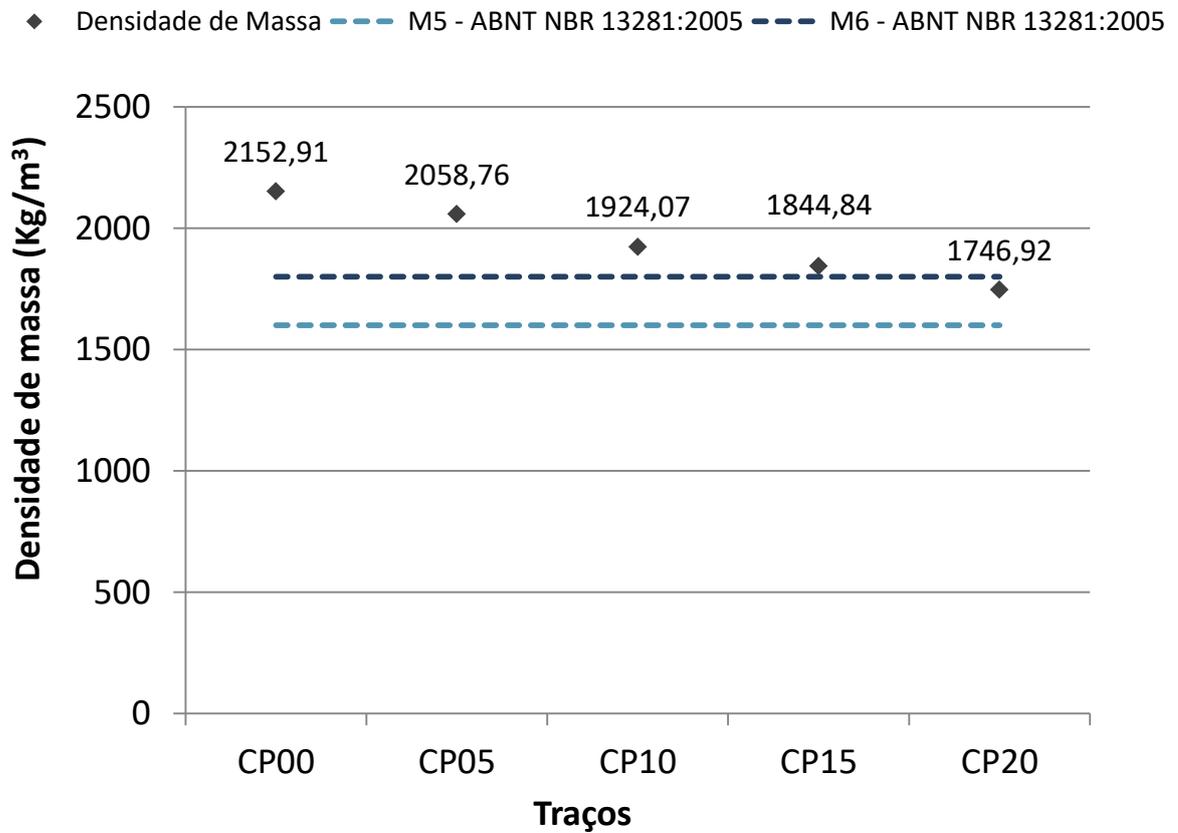
A densidade de massa foi determinada quando os corpos de prova completaram a idade de 28 dias, conforme especifica a ABNT NBR 13280:2005. Os resultados obtidos para a densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Densidade de massa aparente no estado endurecido.

Argamassa	Densidade de Massa (kg/m ³)	Norma (ABNT NBR 13281:2005)
CP00	2152,91	M6 (>1800)
CP05	2058,76	M6 (>1800)
CP10	1924,07	M6 (>1800)
CP15	1844,84	M5 (1600 a 2000)
CP20	1746,92	M5 (1600 a 2000)

As argamassas com substituição do agregado miúdo por resíduo de borracha apresentaram uma redução nos valores da densidade de massa aparente que variaram entre 2152,91 e 1746,92 kg/m³. De acordo com a ABNT NBR 13281:2005, as argamassas sem borracha, com 5% e 10% de resíduos de borracha recebem estão na classe M6 e as argamassas com 15% e 20% estão na classe M5. As variações das densidades estão representadas na Figura 45.

Figura 45: Variação da densidade de massa no estado endurecido

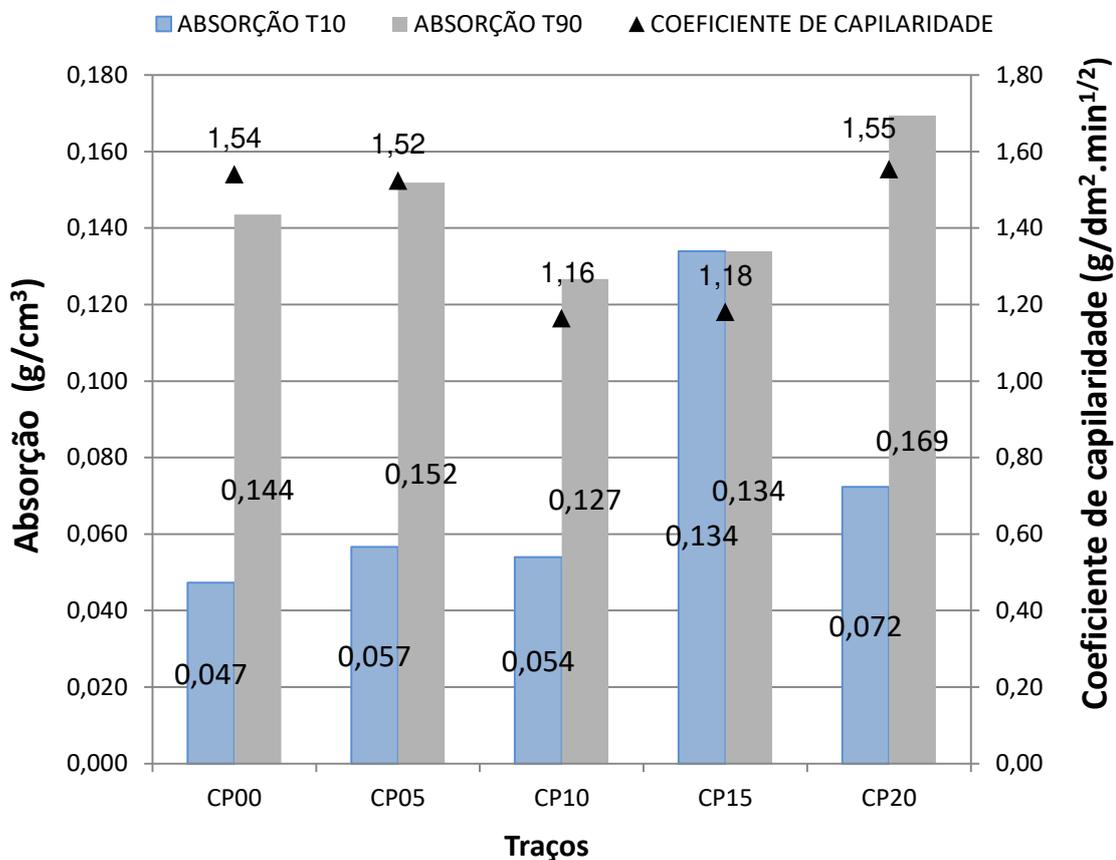


A diminuição da densidade de massa no estado endurecido, em relação ao traço de referência, corresponde a: 4,37% para o traço CP05, 10,63% para o traço CP10, 14,31% para o traço CP15, 18,86% para o traço CP20.

5.3.2 Absorção de água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

A partir dos ensaios de absorção por capilaridade foi possível traçar as curvas de absorção, que representa em massa a quantidade de água que é absorvida por cada argamassa estudada e o coeficiente de capilaridade que indica a velocidade com que a absorção de água se processa [FARIA et al., 2007]. De acordo com a Figura 46, observa-se uma absorção mais rápida nos momentos iniciais do ensaio, após os primeiros 10 min, e de forma gradual com o passar do tempo.

Figura 46: Variação da absorção por capilaridade.



Neste trabalho, as argamassas estudadas apresentaram uma redução na absorção de água por capilaridade nas amostras com 10% de resíduos de borracha. Porém as argamassas com 20% de resíduos de borracha apresentaram valores mais elevados de absorção, o que pode ser verificado nas imagens de sua microestrutura.

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise das amostras por meio da microscopia eletrônica de varredura possibilitou avaliar a microestrutura das argamassas estudadas.

As Figuras 47 e 48 apresentam a microestrutura da argamassa de referência (CP00). Nas imagens é possível verificar a aderência entre a pasta e o agregado miúdo, algumas microfissuras ocasionadas na interface do agregado miúdo e matriz. Porém, a pasta apresenta-se densa e compacta, com baixa quantidade de poros comparando-se aos demais traços.

Figura 47: Microscopia da argamassa de referência CP00 - 500 μ m.

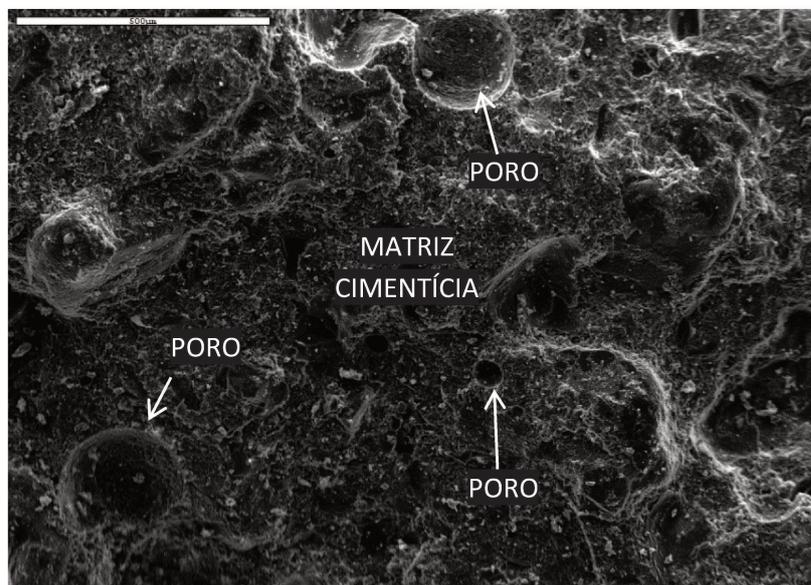
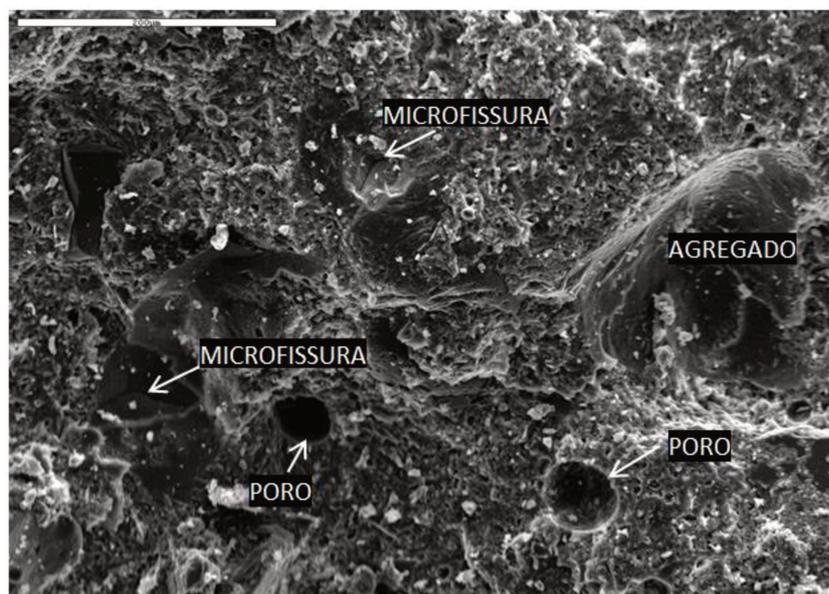


Figura 48: Microscopia da argamassa de referência CP00 - 200 μ m.



Nas Figuras 49 e 50 das argamassas com 5% de resíduos de borracha apresenta zona de transição evidente, há um aumento na quantidade de poros e é possível verificar a formação dos cristais de hidratação que envolvem completamente as partículas de borracha.

Figura 49: Microscopia da argamassa com 5% de resíduos de borracha CP05 - 100 μ m.

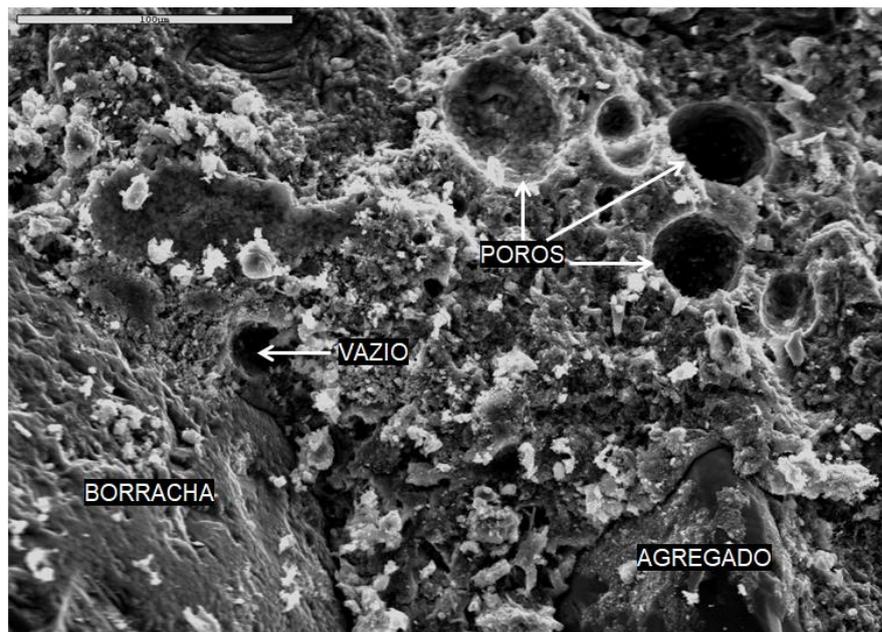
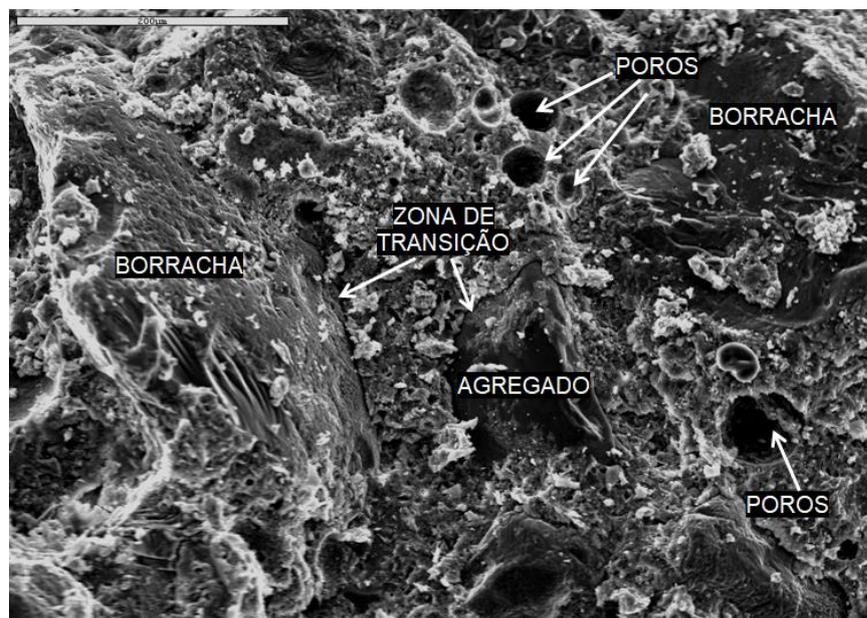


Figura 50: Microscopia da argamassa com 5% de resíduos de borracha CP05 - 200 μ m.



As Figuras 51 e 52 apresentam a microestrutura da argamassa com 10% de resíduos de borracha. É possível verificar o aumento da quantidade de poros e de cristais de hidratação. A zona de transição entre o resíduo de borracha e a matriz cimentícia é bastante evidenciada.

Figura 51: Microscopia da argamassa com 10% de resíduos de borracha CP10 - 500 μ m.

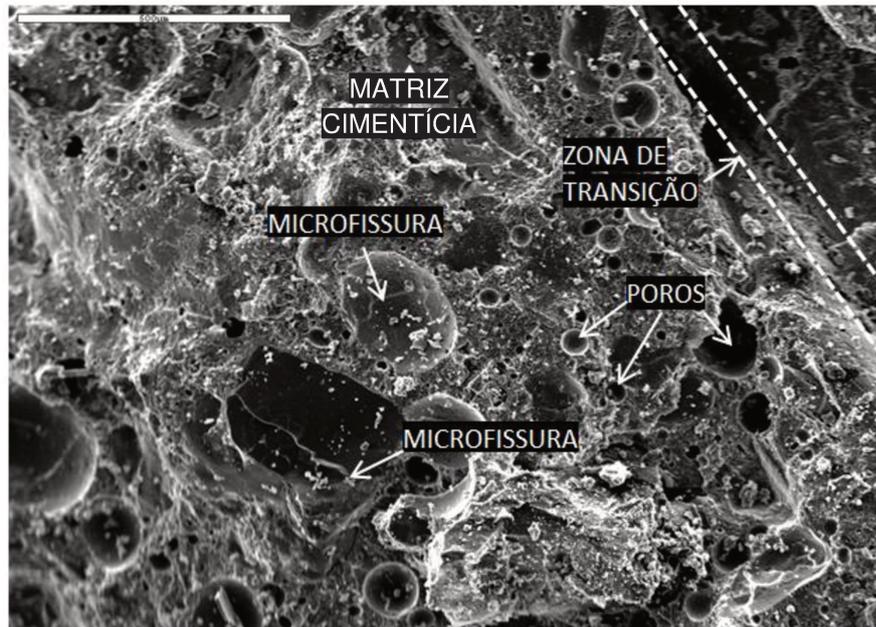
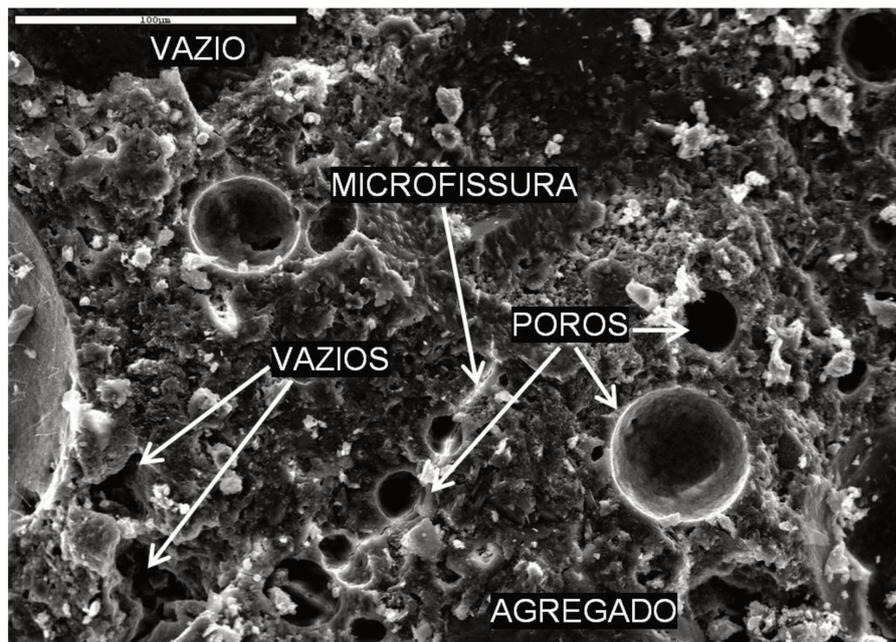


Figura 52: Microscopia da argamassa com 10% de resíduos de borracha CP10 - 100 μ m.



As Figuras 53 e 54 apresentam a microscopia das argamassas com 15% de resíduos de borracha. Nota-se um aumento na quantidade e dimensões de poros, presença de vazios e microfissuras, e ainda, a interface entre a borracha e a matriz cimentícia é marcante.

Figura 53: Microscopia da argamassa com 15% de resíduos de borracha CP15 -
200µm

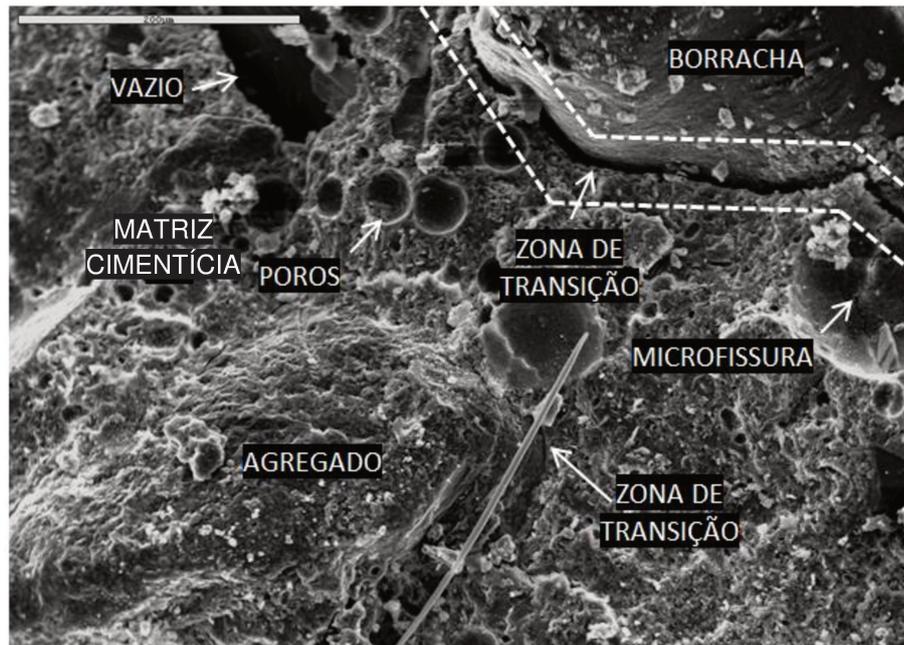
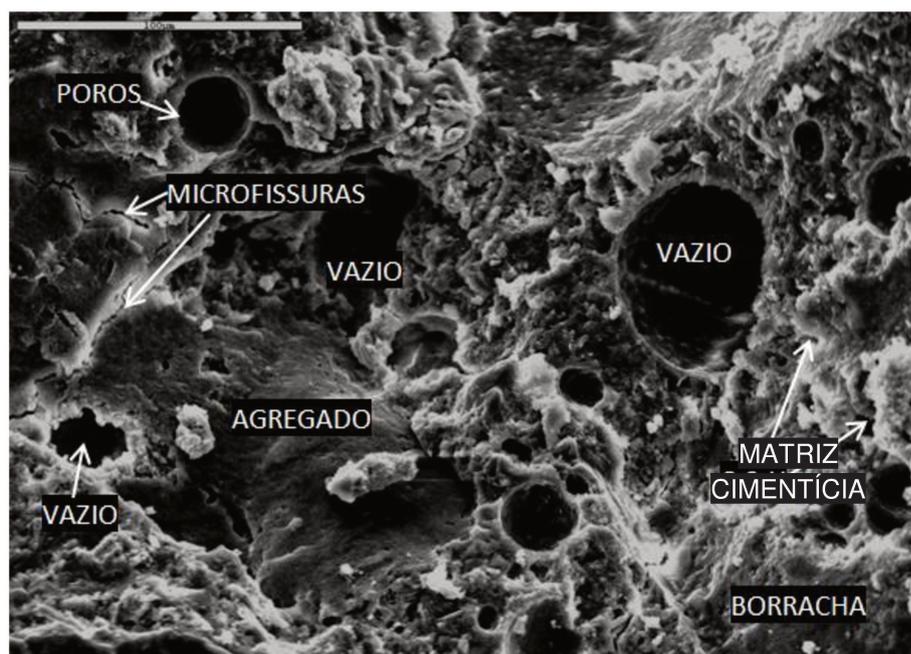


Figura 54: Microscopia da argamassa com 15% de resíduos de borracha CP15 -
100µm.



As Figuras 55 e 56 apresentam as microestruturas das argamassas com 20% de resíduos de borracha. É possível verificar um grande número de poros e a presença de cristais de hidratação. A zona de transição entre a borracha e a matriz cimentícia também é bastante evidenciada.

Figura 55: Microscopia da argamassa com 20% de resíduos de borracha CP20 - 500 μ m.

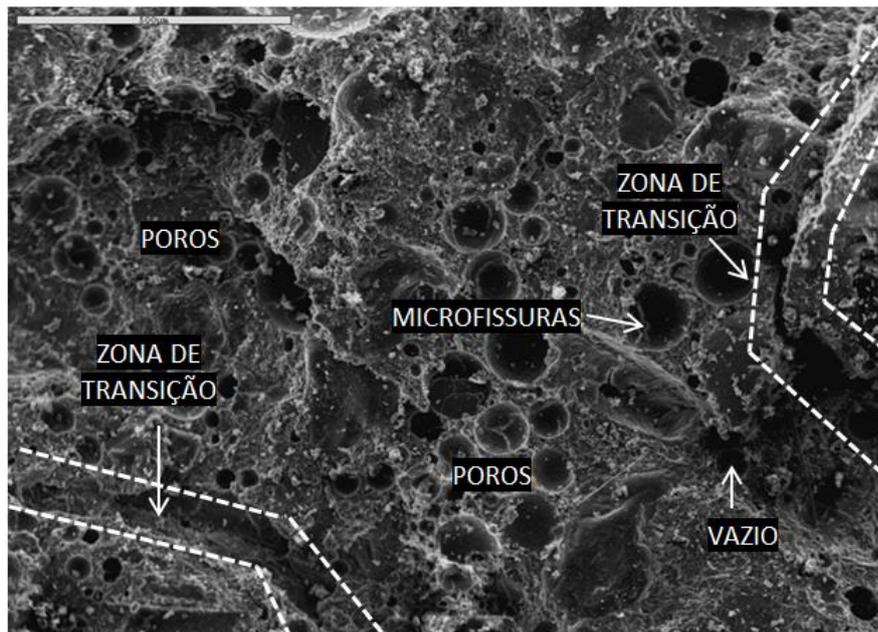
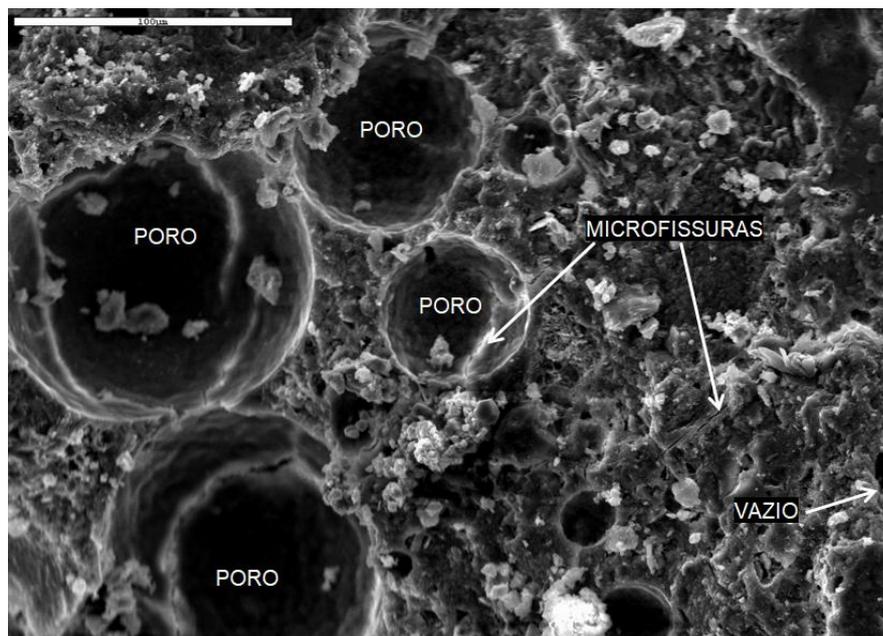


Figura 56: Microscopia da argamassa com 20% de resíduos de borracha CP20 - 100 μ m.



É possível verificar que, com teores crescentes de incorporação de resíduos de borracha nas misturas há aumento do número e tamanho dos poros, microfissuras, resultando em uma estrutura menos compacta, e marcante zona de transição. Estas evidências justificam o comportamento do material nos estados fresco e endurecido, como por exemplo, a diminuição das resistências à compressão e à tração na flexão das argamassas com teores crescentes de borracha.

Nas imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura das argamassas contendo borracha nota-se também, uma maior quantidade de poros do tipo esferoidais propiciando um aumento no volume de ar incorporado nas misturas.

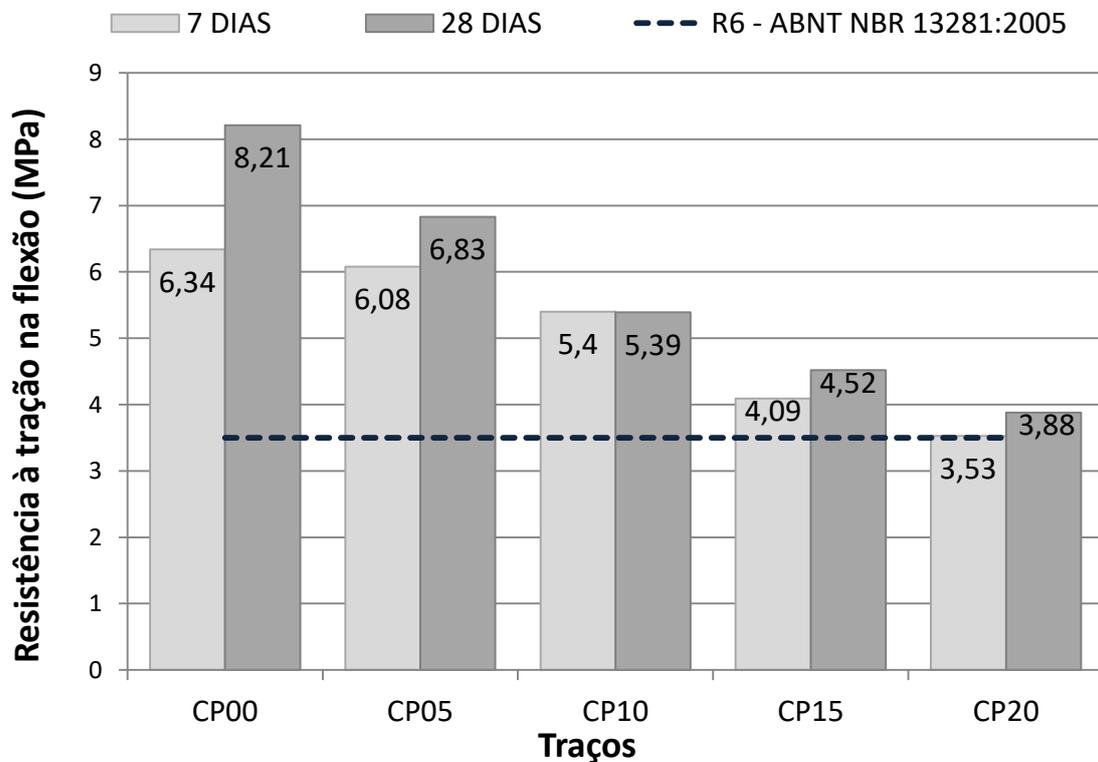
5.5 ENSAIOS MECÂNICOS

5.5.1 Ensaio para a determinação da resistência à tração na flexão

Os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005), aos 7 e 28 dias de idade, estão na Figura 57.

Observa-se redução nos valores das resistências com o aumento do teor de resíduos de borracha nas argamassas de 16,81%, 34,35%, 44,95% e 52,74%, respectivamente, para os traços CP05, CP10, CP15 e CP20 em relação à argamassa de referência.

Figura 57: Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.



Diversos autores estudaram compósitos cimentícios emborrachados utilizando teores variados de substituição, e observaram comportamento semelhante.

Angelin et al. (2017) obtiveram redução de 77,6% na resistência da tração na flexão para argamassas com até 30% de teor de borracha. Yu et al. (2016) obtiveram redução nas resistências de tração na flexão de aproximadamente 57,7% para argamassas com 50% de teor de borracha. Já Silva et al. (2018) obtiveram valores de 65,19% de redução na resistência à tração na flexão para argamassas com 25% de borracha.

Embora as argamassas estudadas neste trabalho tenham apresentado queda nas resistências à tração na flexão, todas as amostras atenderam aos requisitos da ABNT NBR 13281:2005, sendo classificadas como R6, ou seja, com valores acima de 3,5 MPa.

5.5.2 Ensaio para a determinação da resistência à compressão

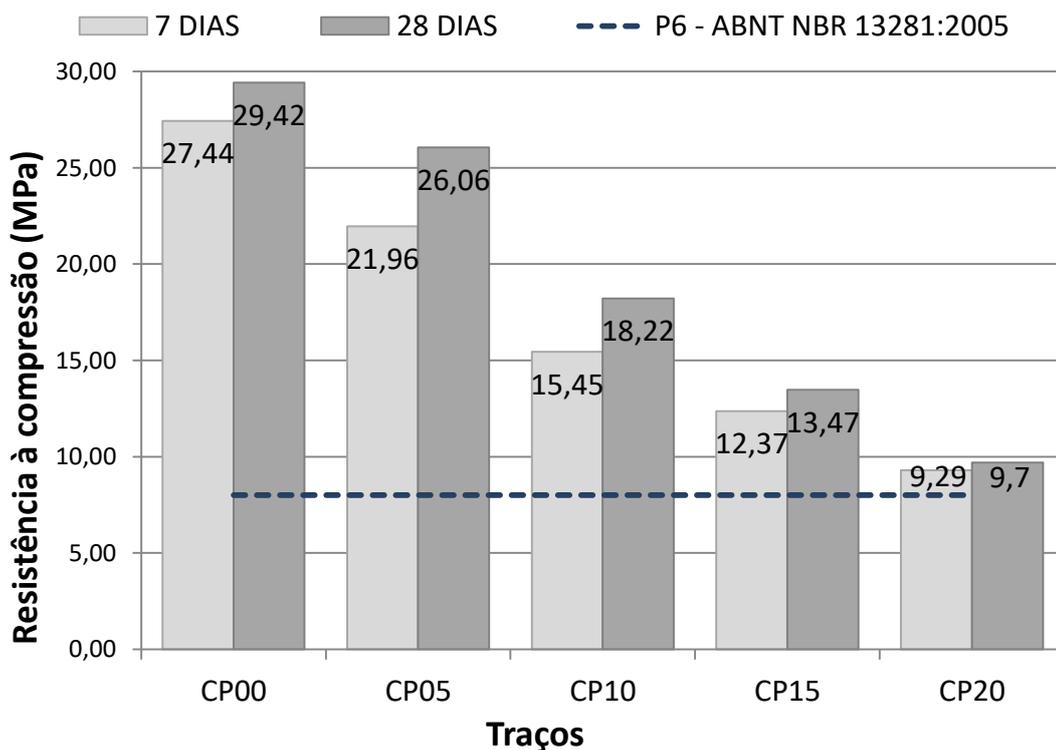
Como esperado, tanto os valores de resistência à tração na flexão como a resistência à compressão diminuíram com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha, medidas aos 7 e 28 dias de idade, conforme Figura 58.

Porém, as taxas de resistência se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 13281:2005

A redução das resistências correspondeu a 11,42%, 38,07%, 54,21% e 67,03%, respectivamente, para os traços CP05, CP10, CP15 e CP20 em relação à argamassa de referência.

Embora as argamassas estudadas tenham apresentado queda para esta propriedade, todas as amostras atenderam aos requisitos da ABNT NBR 13281:2005, sendo classificadas como P6, ou seja, com valores acima de 8,0 MPa.

Figura 58: Resultados do ensaio de resistência à compressão.



As argamassas emborrachadas apresentam valores reduzidos de resistência mecânica, seja de tração ou compressão. Essa característica se deve a uma maior fragilidade da zona de transição, maior porosidade das argamassas causada pelo ar retido durante a elaboração das argamassas (PCZIECZEK et al., 2017) e as baixas propriedades mecânicas da borracha (CANOVA et al., 2015).

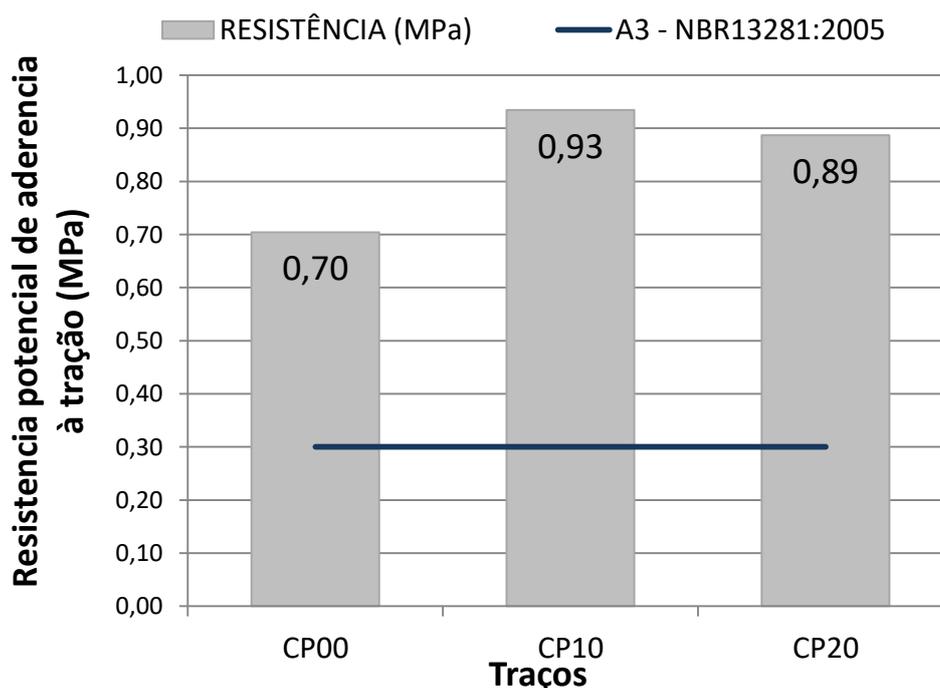
Essa porosidade foi observada através das imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura, onde, as argamassas que continham maiores teores de substituição de borracha apresentaram maior porosidade, zona de transição evidente, justificando a diminuição tanto da resistência à tração na flexão como da resistência à compressão.

5.5.3 Ensaio de Resistência Potencial de Aderência à Tração

As argamassas estudadas foram avaliadas e classificadas segundo a ABNT NBR 13281:2005 que determina os requisitos para as argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. O ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizado a fim de avaliar a capacidade de aderência das argamassas.

Este ensaio foi realizado somente para os traços CP00, CP10 e CP20, e os resultados obtidos estão na Figura 59.

Figura 59: Resistência potencial de aderência à tração.



O ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizado utilizando placas de concreto como substrato. Todas as composições de argamassas ensaiadas atenderam os limites da ABNT NBR 13281:2005 para esta propriedade, sendo classificadas como A3, ou seja, resistências acima de 0,30 MPa, portanto, podem ser utilizadas para revestimento de tetos e paredes.

As formas de ruptura observadas no ensaio, segundo a ABNT NBR 13529:2019, foram:

- As argamassas de referência apresentaram ruptura na interface entre o substrato e a argamassa;
- As argamassas de traço CP10 obtiveram um aumento na resistência de aproximadamente 32,8% em relação à argamassa de referência, e também apresentaram ruptura na interface entre o substrato e a argamassa (Figura 60);
- As argamassas de traço CP20 obtiveram um aumento na resistência de 27% em relação à argamassa de referência e uma queda de aproximadamente 4,3% em relação à argamassa CP10, e apresentaram tanto ruptura na interface entre o substrato e a argamassa, como dentro da camada de argamassa, justificando a ligeira queda na resistência (Figura 61).

Figura 60: Ruptura dos corpos de provas CP10



Figura 61: Ruptura dos corpos de provas CP20



5.5.4 Análise de variância ANOVA

Os dados coletados nos ensaios de resistência à compressão e densidade de massa no estado endurecido foram tratados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA) utilizando o software Action Stat Pro. A Tabela 18 apresenta os dados para o ensaio de resistência à compressão, sendo que as amostras apresentaram poder amostral de 86,48 % para um nível de significância de 5%.

Tabela 18: Poder e tamanho amostral - Resistência à compressão.

Poder e Tamanho da amostra - ANOVA	
Poder	0,86
Níveis	5
Réplica	5
Diferença	20,99
Desvio padrão	7,88
Nível de significância	0,05

A Tabela 19 apresenta os dados para o ensaio de determinação da densidade de massa no estado endurecido, as amostras apresentaram poder amostral de 94,55 % e nível de significância de 5%.

Tabela 19: Poder e tamanho amostral - Densidade de massa.

Poder e Tamanho da amostra - ANOVA	
Poder	0,95
Níveis	5
Réplica	6
Diferença	405,99
Desvio padrão	149,84
Nível de significância	0,05

A Tabela 20 apresenta a média dos resultados e os limites inferiores e superiores para o ensaio de resistência à compressão e a Tabela 21 apresenta os valores para a determinação da densidade de massa no estado endurecido.

Tabela 20: Efeito - Resistência à compressão.

Tabela de Efeito			
Fator	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
Referência	29,80	30,646	31,49
CP05	24,76	25,6	26,44
CP10	17,37	18,214	19,06
CP15	12,68	13,522	14,36
CP20	8,86	9,698	10,54

Tabela 21: Efeito - Densidade de massa.

Tabela de Efeito			
Fator	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
Referência	2131,71	2152,91	2174,10
CP05	2037,57	2058,76	2079,96
CP10	1902,87	1924,07	1945,27
CP15	1823,64	1844,83	1866,03
CP20	1725,72	1746,92	1768,11

As Tabelas 22 e 23 demonstram que a estatística de teste (F) dos valores das médias amostrais são altos e o p-valor baixo, indicando que existem diferenças significativas entre as médias.

Tabela 22: Estatística F e P-valor - Resistência à compressão.

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Fator	4	1474,53	368,63	452,64	2,64 E-19
Resíduos	20	16,29	0,8144		

Tabela 23: Estatística F e P-valor - Densidade de massa.

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P.valor
Fator	4	635242,68	158810,67	249,85	9,20 E-20
Resíduos	25	15890,49	635,62		

A análise de variância ANOVA realiza o tratamento dos valores obtidos nos ensaios por meio das médias amostrais, indicando se existem diferenças estatísticas significativas entre esses valores. Quando é determinado o nível de significância em 95%, admite-se que 5% dos resultados pode não apresentar essa diferença. Porém, a ANOVA não indica em quais níveis estão essas diferenças.

Para poder se certificar em quais níveis existem diferenças significativas nos resultados, foi realizado o teste de Tukey, que coleta os dados entre os níveis e faz comparações de dois em dois, dividindo-os em famílias. Os pares que apresentam o p-valor abaixo de 0,05 são considerados diferentes estatisticamente.

As Tabelas 24 e 25 apresentam os dados obtidos no teste de Tukey através de comparações múltiplas para o ensaio de resistência à compressão e densidade de massa.

Tabela 24: Comparações múltiplas - Resistência à compressão.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
CP05-Referência	-5,046	-6,75	-3,34	2,23 E-07
CP10-Referência	-12,43	-14,14	-10,72	3,90 E-14
CP15-Referência	-17,12	-18,83	-15,42	1,93 E-14
CP20-Referência	-20,95	-22,66	-19,24	1,92 E-14
CP10-CP05	-7,39	-9,10	-5,68	3,33 E-10
CP15-CP05	-12,08	-13,79	-10,37	5,15 E-14
CP20-CP05	-15,90	-17,61	-14,19	1,94 E-14
CP15-CP10	-4,69	-6,40	-2,98	7,05 E-07
CP20-CP10	-8,52	-10,22	-6,81	2,57 E-11
CP20-CP15	-3,82	-5,53	-2,12	1,45 E-05

Tabela 25: Comparações múltiplas - Densidade de massa.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
CP05-Referência	94,14	51,39	136,89	8,36 E-06
CP10-Referência	228,84	186,08	271,58	2,09 E-13
CP15-Referência	308,07	265,32	350,82	3,30 E-14
CP20-Referência	405,99	363,24	448,74	3,28 E-14
CP10-CP05	-134,69	-177,44	-91,94	1,44 E-08
CP15-CP05	-213,93	-256,68	-171,18	8,30 E-13
CP20-CP05	-311,85	-354,60	-269,10	3,30 E-14
CP15-CP10	-79,24	-121,99	-36,49	0,00011
CP20-CP10	-177,15	-219,90	-134,40	5,16 E-11
CP20-CP15	-97,92	-140,67	-55,17	4,44 E-06

Quando os resultados são divididos em famílias, fica evidente a existência ou não de diferenças estatísticas entre as médias amostrais. As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores divididos em famílias.

Tabela 26: Agrupamento dos resultados - Resistência à compressão.

Agrupamento		
Fator	Médias	Grupos
Referência	30,646	a
CP05	25,6	b
CP10	18,214	c
CP15	13,522	d
CP20	9,698	e

Tabela 27: Agrupamento dos resultados - Densidade de massa.

Agrupamento		
Fator	Médias	Grupos
Referência	2152,91	a
CP05	2058,76	b
CP10	1924,07	c
CP15	1844,83	d
CP20	1746,92	e

6 ENSAIOS ESPECIAIS

Após a análise estatística dos resultados dos ensaios de densidade de massa no estado endurecido e resistência à compressão, optou-se por realizar os ensaios especiais (desempenho acústico, condutividade térmica e módulo de elasticidade dinâmico) somente para as argamassas de traços CP00, CP10 e CP20.

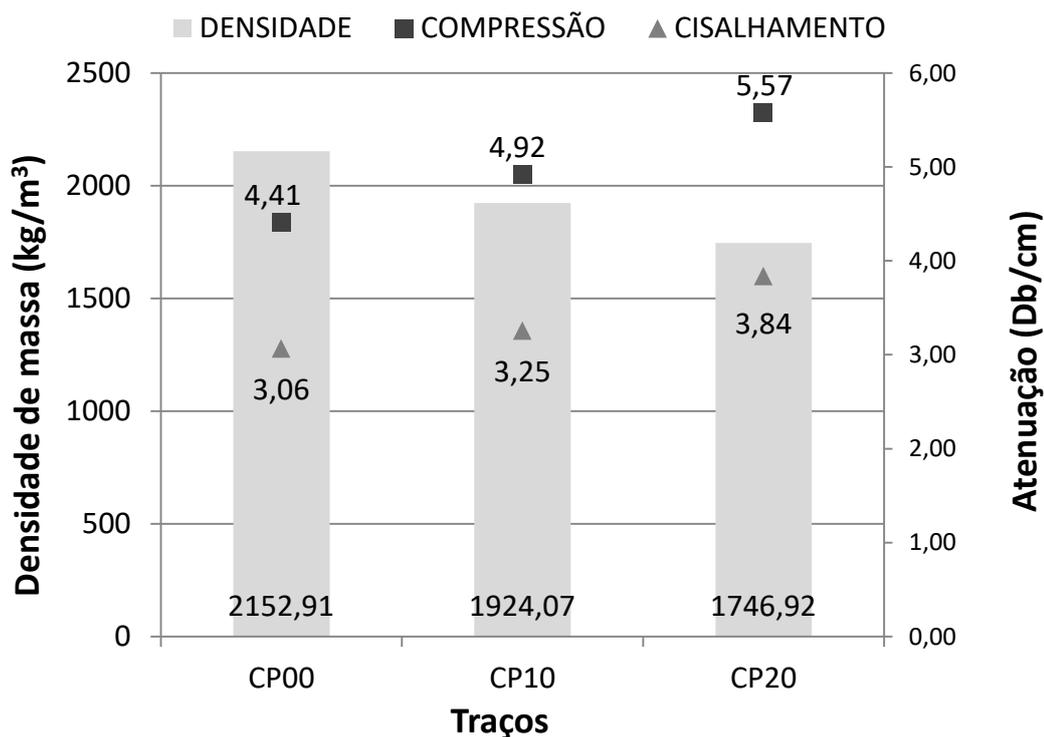
6.1 DESEMPENHO ACÚSTICO DAS ARGAMASSAS

O ensaio de ultrassom realizado nas amostras de argamassas contendo resíduos de borracha demonstrou um aumento na atenuação acústica tanto nas ondas de compressão, como nas ondas de cisalhamento.

Entre as amostras CP00 e CP10 houve um aumento na atenuação de propagação das ondas de compressão de ~11,56%, e nas ondas de cisalhamento um aumento de ~6,02%. Entre as amostras CP10 e CP20 houve um aumento na atenuação da propagação de ~13,21% nas ondas de compressão, e de ~18,15% nas ondas de cisalhamento.

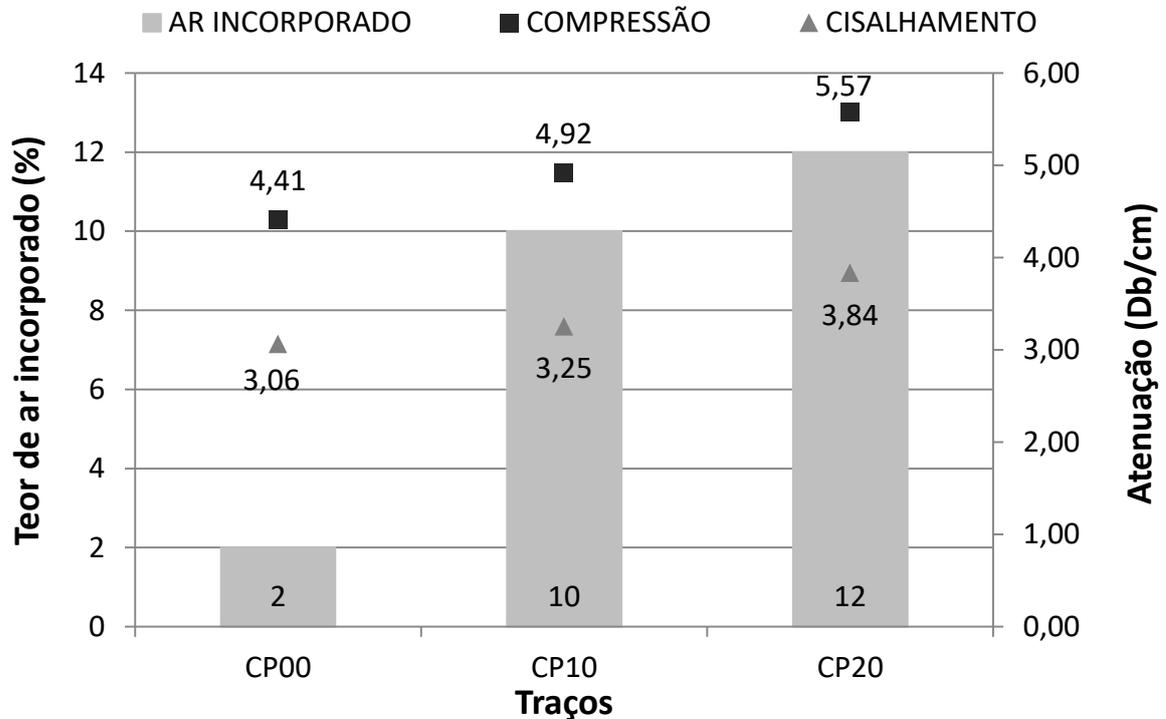
A absorção do som é mais eficiente em materiais porosos e menos densos. A Figura 62 demonstra um aumento na atenuação das ondas quando relacionadas à diminuição da densidade de massa das amostras.

Figura 62: Variação da atenuação acústica em relação à densidade de massa.



A quantidade de vazios também atua de maneira significativa em relação ao desempenho acústico dos materiais (Figura 63).

Figura 63: Variação da atenuação acústica em relação ao teor de ar incorporado.



Compósitos cimentícios têm se mostrado eficientes em relação ao desempenho acústico devido à maior porosidade e densidade quando relacionados a compósitos convencionais. Diversos autores estudaram compósitos cimentícios emborrachados e constataram melhorias nas características acústicas desses materiais. A Tabela 28 apresenta os valores encontrados em seus estudos e o método utilizado para a avaliação.

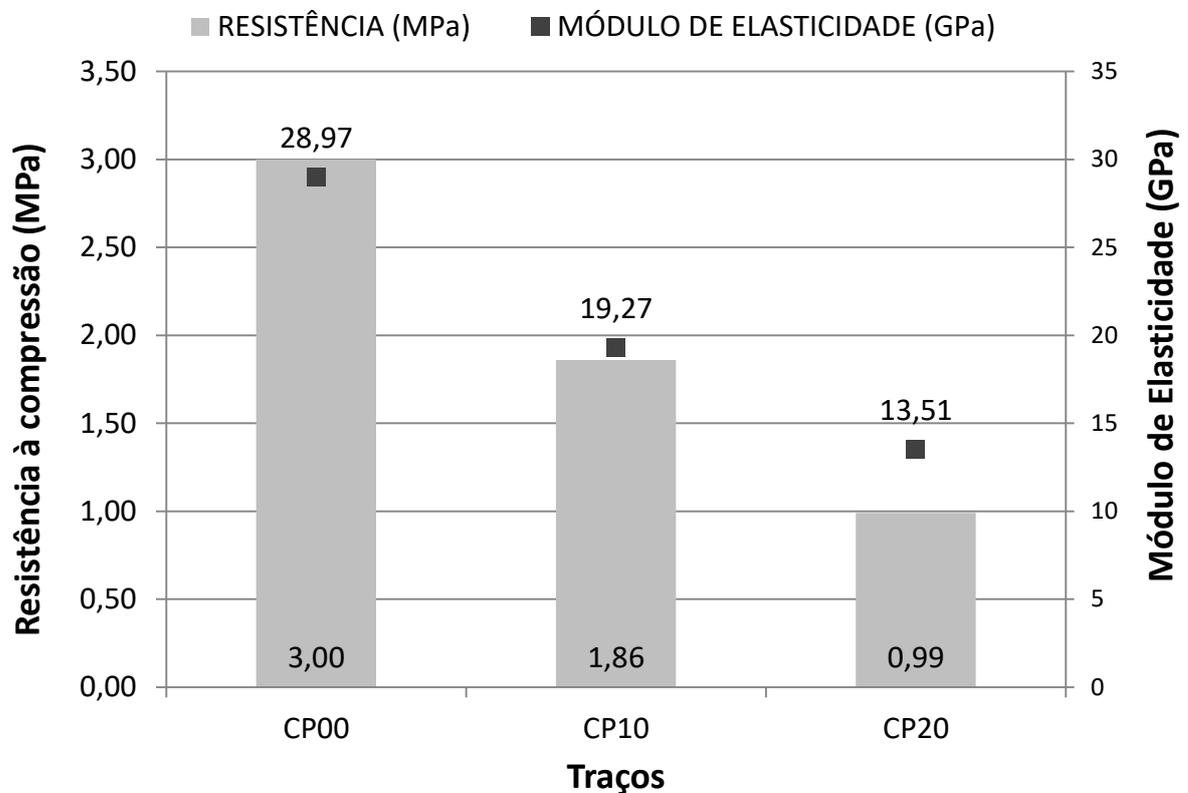
Tabela 28: Resultados das propriedades acústicas estudadas por diversos autores

Autores	Material	Teor de Substituição	Características Estudadas	Método de Ensaio	Resultados
Holmes et al (2014)	Painéis de Concreto	8%	Absorção	Sala reverberante	0,75
Ghizdăvet et al (2016)	Concreto	5%	Absorção	Interferômetro Acústico	0,52
		8%			0,93
Silva et al (2018)	Pasta de Cimento	25%	Atenuação	Ultrassom	0,97
		30%			1,06
Angelin (2018)	Concreto autoadensável	25%	Atenuação	Ultrassom	1,90
		50%			2,10

6.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Figura 64 apresenta o resultado obtido, por meio do ultrassom, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. As argamassas com resíduos de borracha apresentaram queda para esta propriedade, de 33,5% para o traço CP10 e 53,36% para o traço CP20 em relação ao traço de referência.

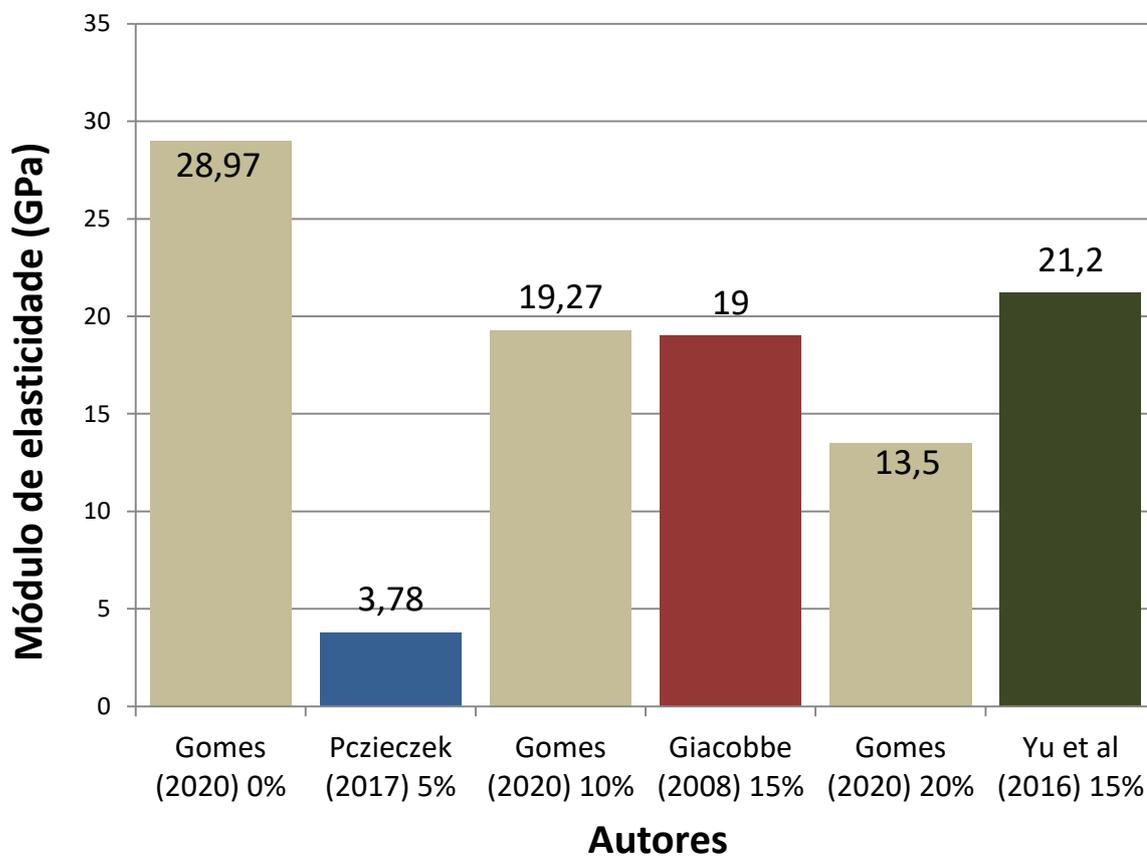
Figura 64: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade e resistência à compressão.



Nas argamassas emborrachadas, devido ao aumento da porosidade da pasta e a menor adesão entre os resíduos de borracha à matriz cimentícia, é esperado uma diminuição das resistências à tração na flexão assim como na resistência à compressão, e conseqüentemente uma queda no módulo de elasticidade.

A Figura 65 apresenta alguns resultados do valor do módulo de elasticidade obtidos por outros autores e os teores de borracha empregado nas misturas.

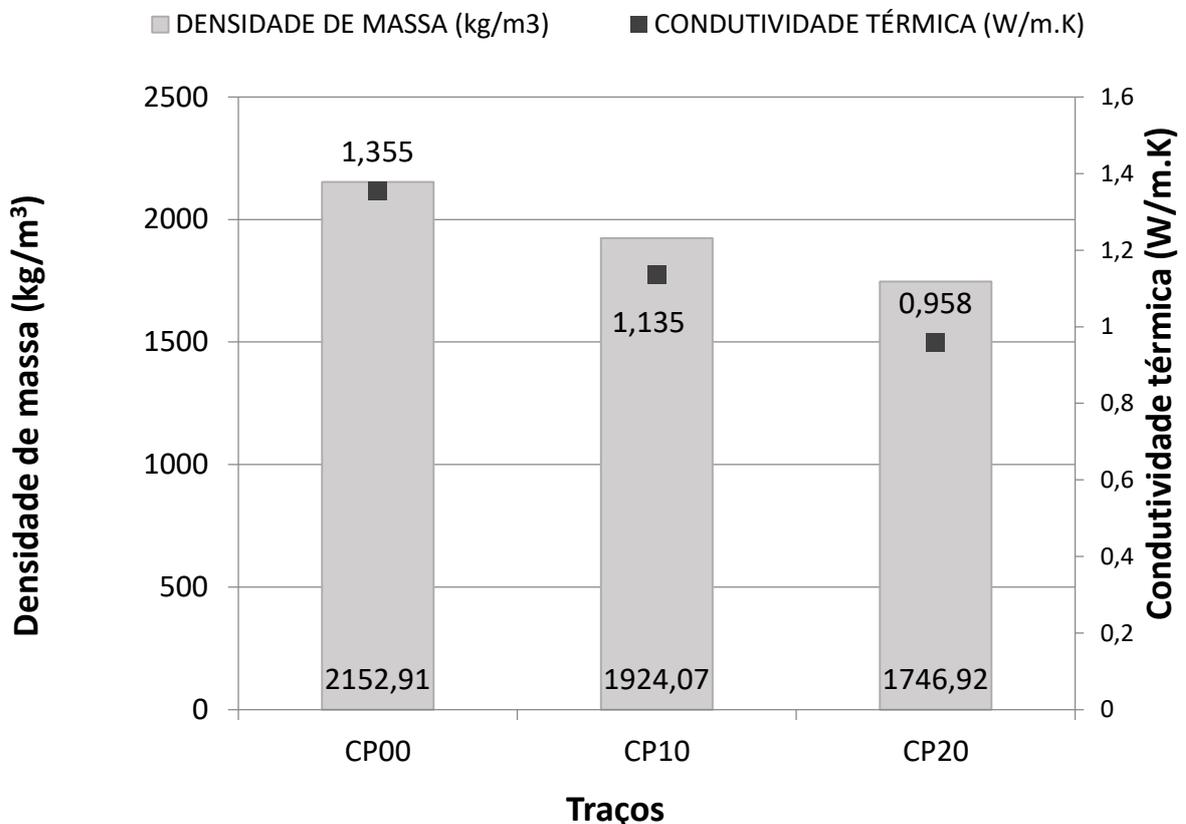
Figura 65: Resultados de módulo de elasticidade obtidos por outros autores comparados com este.



6.3 ENSAIO PELO MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA PARA A AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Este ensaio foi realizado para a avaliação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida nas amostras de argamassas que apresentaram resultados mais significativos, ou seja, para os traços CP00, CP10 e CP20. A Figura 66 apresenta os resultados obtidos no ensaio para a determinação da condutividade térmica.

Figura 66: Correlação entre os resultados de condutividade térmica e densidade de massa.



Nas argamassas estudadas, foi identificada uma diminuição na condutividade térmica, de aproximadamente 16% e 29%, respectivamente, para as argamassas com 10% e 20% de resíduos de borracha quando comparadas à argamassa de referência.

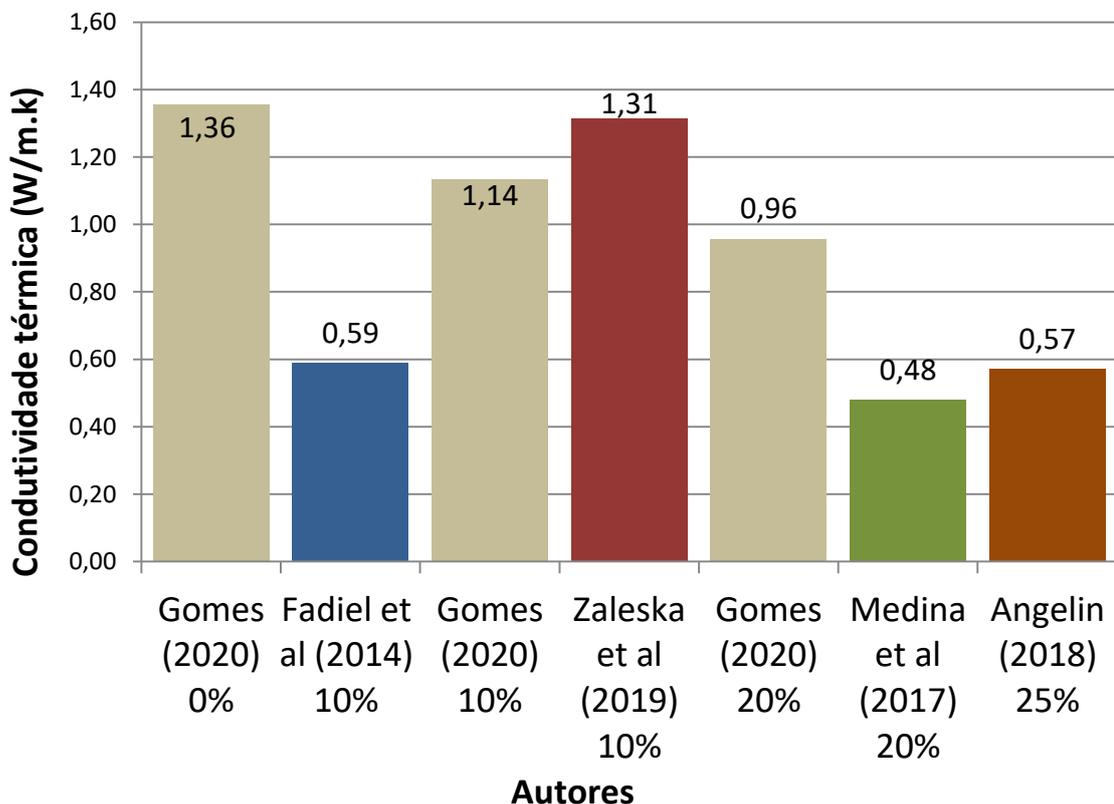
O concreto normal, segundo a ABNT NBR 15220-3:2005, apresenta condutividade térmica de 1,75 W/(m.k), a argamassa tradicional de 1,15 W/(m.k) e a borracha 0,40 W/(m.k). As argamassas emborrachadas estudadas neste trabalho

apresentaram valores de 1,135 W/(m.k) e 0,985 W/(m.k) de condutividade térmica para as argamassas com 10% e 20% de resíduos de borracha.

Essa diminuição na condutividade térmica pode ser justificada pela baixa densidade de massa das argamassas emborrachadas, pelo aumento na porosidade verificado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, e pela baixa condutividade térmica da borracha que, segundo a ABNT NBR 15220-3:2005, apresenta a condutividade térmica em média de 0,40 W/(m.k).

Diversos autores utilizaram diferentes técnicas e equipamentos para a avaliação da condutividade térmica de compósitos cimentícios com teores de substituições variados. Fadiel et al. (2014) utilizaram uma câmara térmica e termopares como sensores de fluxo de calor; Zaleska et al. (2019) utilizaram uma sonda de superfície circular; Medina et al. (2017) utilizaram câmara térmica com termostatos acoplados como reguladores térmicos; e Angelin (2018), em seus estudos sobre concreto leve autoadensável, utilizou o método da placa quente protegida. A Figura 67 apresenta os resultados obtidos neste trabalho, frente aos resultados obtidos nos trabalhos acima citados.

Figura 67: Resultados obtidos por outros autores frente aos obtidos neste trabalho.



7 CONCLUSÕES

A utilização de resíduos de borracha de pneus inservíveis na substituição parcial do agregado miúdo em argamassas de assentamento e revestimento apresentou resultados satisfatórios em relação às propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Todas as misturas de argamassas realizadas foram classificadas segundo a ABNT NBR 13281:2005 pertencentes à classe P6 para resistência à compressão e classe R6 para a resistência à tração na flexão. A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão diminuíram com a adição de borracha, devido ao aumento de ar incorporado na argamassa no estado plástico.

Com a substituição do agregado miúdo por borracha houve uma redução da massa específica da argamassa, tornando-a mais leve e trabalhável. Como o aumento do teor de substituição, houve um aumento nos valores de ar incorporado e na absorção de água por capilaridade, resultando em uma argamassa mais permeável comparado com a argamassa de referência. A inclusão de borracha não alterou a consistência das argamassas, que apresentaram propriedades compatíveis com as exigências das especificações técnicas referentes às argamassas de assentamento e revestimento para edificações.

Quanto às propriedades acústicas, o teor de ar incorporado aumentou com teores crescentes de borracha nas misturas, assim como o coeficiente de atenuação acústica, tanto para as ondas de compressão como de cisalhamento.

Quanto às propriedades térmicas, houve redução da condutividade térmica de 16% e 29% para as argamassas com 10% e 20% de resíduos de borracha, respectivamente, em relação ao traço de referência.

Com relação à análise da microestrutura das argamassas, a argamassa de referência apresentou pasta de cimento densa e compacta. Aumentando-se o teor de borracha nos traços de argamassa observou-se aumento do número de vazios na pasta de cimento, aparecimento de microfissuras e zona de transição acentuada entre os agregados e a pasta de cimento.

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa é possível afirmar a viabilidade técnica do uso de resíduos de borracha de pneus inservíveis em argamassas para assentamento e revestimento para os traços estudados. Além disso o emprego de resíduos de borracha em argamassas passa a ser uma alternativa sustentável no desenvolvimento de produtos para a construção civil.

8 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Estudo de outros traços de argamassa de cimento Portland contendo resíduos de borracha e adições minerais;
- Estudo da viabilidade econômica de argamassas com borracha.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C270:19AE1. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ANGELIN, F. A.; LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.; OSÓRIO, W. R.. ***The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement with recycled rubber.*** Construction and Building Materials, v. 151, p. 534-545, 2017.

ANGELIN, A. F.; SILVA, F.M; BARBOSA, L. A.G.; LINTZ, R. C.; CARVALHO, M. A. G.; FRANCO, R.A.S. ***Voids identification in rubberized mortar digital images using k-means and watershed algorithms.*** Journal of Cleaner Production, v. 164, p. 455-464, 2017.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.. ***Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados.*** IBRACON Structures and Materials Journal, IBRACON, v. 11, n. 1, p. 76-94, 2018.

ANGELIN, A. F. ***Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmico acústico da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado (CLAE).*** Tese de doutorado. Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, 2018.

ANGELIN, A. F.; MIRANDA J.R. E.J.P.; SANTOS, J. M. C.; LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.. ***Rubberized mortar: The influence of aggregate granulometry in mechanical resistances and acoustic behavior.*** Construction and Building Materials, v. 200, p. 248–254, 2019.

ASLANI, F.; KELIN, J. ***Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumbrubber aggregates exposed to elevated temperatures.*** Journal of Cleaner Production, v. 200, p.1009 – 1025, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: ***Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.*** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13277: ***Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de retenção de água.*** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: ***Argamassa para assentamento e revestimento de paredes de placas cerâmicas – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.*** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-2: **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: Aderência ao substrato.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-3: **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: Aderência superficial.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13749. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14081. **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1: **Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: **Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-4: **Desempenho térmico de edificações, Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15258: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15575: **Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15630: **Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico através da Propagação de Onda Ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Produção e vendas**. Disponível em <www.anip.cpm.br/arquivos/producao_vendas.pdf> Acesso em: 29 de dezembro de 2018.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C270 Standard Specification for Mortar for Unit Masonry 01/05/2019

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1v. São Paulo: IBRACON, 2011.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2ª edição. São Paulo, 2011.

BOUKOUR, S.; BENMALEK, M.L.; **Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate**. Construction and Building Materials, v.120, p. 473–481, 2016.

CAETANO, M. J. L.. CTB – Portal da Ciência e Tecnologia da Borracha. Disponível em: < <https://www.ctborracha.com>> - Acesso em: 29 de dezembro de 2018.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G., **A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. Acta Scientiarum Technology, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G., **Dry ripened mortar with quarry waste and rubber powder from unserviceable tires**. Acta Scientiarum Technology, v. 37, n. 1, p. 25-31, 2015.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G., **Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil v.10, n. 3, p.41-53, 2015.

CARASEK, H.; **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª ed. São Paulo – SP, v 2, 2010.

CARASEK, H.; **Patologia das argamassas de revestimentos**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª ed. São Paulo – SP, v 1, p. 1-11, 2007.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. 2ª edição. Brasília. Thesaurus, 2010.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas produzidas a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. São Carlos, 2013.

CINTRA, C. L. D., PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B.; **Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes**. Cerâmica, v. 60, p.69-76, 2014.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Diário Oficial da União nº 188, Brasília, p. 64-64, 2009. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 29 de dezembro de 2018.

CORREDOR-BEDOYA, A. C.; ZOPPI, R. A.; SERPA, A. L. **Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar – Noise insulation potential**. Cement and Concrete Composites, v. 82, p. 45–66, 2017.

COSTA, H. M.; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES R. C. R., FURTADO, C. R. G., **Aspectos Históricos da Vulcanização. Polímeros**. Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 2, p. 125-129, 2003.

DB COVER – ACOUSTICAL PROTECTION SOLUTIONS. Disponível em <https://dbcover.com>. Acesso em: 19 de setembro de 2019.

FADIEL, A.; RIFAIE, F. A.; ABU-LEBDEH, T.; FINI, E. **Use of Crumb Rubber to Improve Thermal Efficiency of Cement-Based Materials**. American Journal of Engineering and Applied Scienc, v. 7, p.1-11, 2014.

FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. **Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation**. Journal of Cultural Heritage, v. 9, p.338-346, 2008.

FERREIRA, C. R. G.. **Análise de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de argamassas e resíduo de borracha**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal, 2009.

FIORITI, C. F., INO, A., AKASAKI, J. L., **Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus**. Acta Scientiarum Technology, v.32, n.3, p. 237-244, 2010.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2009.

GESOGLU, M. et al. **Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates**. Construction and Building Materials, v. 79, p. 40–47, 2015.

GRUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R.K. **Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume**. Journal of Cleaner Production, v.112, p. 702-711, 2016.

GHIZDĂVEȚ, Z. et al. **Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix**. Construction and Building Materials, v. 124, p. 755–763, 2016.

GUELMINE, L.; HADDA HADJAB, H.; BENZAOUK, A.. **Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar**. Construction and Building Materials, v. 126, p. 77–85, 2016.

GUO, S.; DAI, Q.; SI, R.; SUN, X.; LU, C. **Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire**. Journal of Cleaner Production v.148, p. 681-689, 2017.

HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C.. ***Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement.*** Construction and Building Materials, v. 73, p. 195-2014, 2014.

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. ***Relatório de Pneumáticos.*** Brasília, 2019.

ISAIA, G. C.. ***Concreto: Ciência e Tecnologia.*** 1v. São Paulo: IBRACON, 2011.

KARAKURT, C.. ***Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview.*** Journal of Material Cycles and Waste Management, v.17, p. 422–433,2015.

KURZ, M.N.; BRANDELLI, T. M.; PALIGA, C.M.; TORRES, A.S.. ***A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânica.*** Revista Matéria, v.23, n.3, 2018.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S.; ***Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil,*** Polímeros : Ciência e Tecnologia, v. 18, nº 2, p. 106-118, 2008.

MARTINS, I. R. F.. ***Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu.*** 2005. 132 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/91486>>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. ***Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.*** 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEDINA, N.F.; MEDINA, D.F.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.. ***Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete.*** Construction and Building Materials v.129, p. 25–36, 2016.

MEDINA, N.F.; MEDINA, D.F.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; NAVACERRADA, M. A.. ***Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling.*** Construction and Building Materials, v. 144, p. 563–573, 2017.

MURGEL, E. ***Fundamentos de acústica ambiental.*** São Paulo. Senac, 2007.

OKTAY, H.; YUMRUTAŞ, R.; AKPOLAT, A. ***Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes.*** Construction and Building Materials, v. 96, p. 217–225, 2015.

OLIVEIRA, M. A. S.; CASSU, S. N.; MELLO, S. A. C.; & DUTRA, J. C. N.. ***Influência do método de vulcanização nas propriedades mecânicas e na densidade de ligações cruzadas da borracha natural.*** Polímeros, v. 26 (número especial), p.43-48, 2016.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P., **Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido**. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª ed. São Paulo: IBRACOM – SP, v 1, 2011.

PCZIECZEK, A. et al., **Properties of mortars containing tire rubber waste and expanded polystyrene (EPS)**. Journal of Urban and Environmental Engineering, v.11, p.219-225, 2017.

PCZIECZEK, A.. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

PETROBRÁS - PETROLEOS DO BRASIL <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/unidade-de-industrializacao-do-xisto-six.htm>. Acesso em: 22 de setembro de 2019.

PINHO, E. B.; OTZ, E. P.; BORGES, L. E. P. **Reciclagem Química de Pneus Inservíveis: Recuperação de Frações Líquidas Via Pirólise Térmica e Catalítica**. Revista Virtual de Química, v.10. 2018.

PORTAL ACTION. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br>. Acesso em 15 de outubro de 2019.

PORTAL CTB - CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. Disponível em: <https://www.ctborracha.com>. Acesso em 29 de setembro de 2019.

RAFFOUL, S.; GARCIA, R.; PILAKOUTAS, K.; GUADAGNINI, M.; MEDINA, N.F.. **Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation**. Construction and Building Materials, v. 124, p.391– 404, 2016.

RECICLANIP. Disponível em: <<http://www.reciclanip.com.br>>. Acesso em: 29 de dezembro de 2018.

SI, R.; WANG, J.; GUO, S.; DAI, Q.; HAN, S. **Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber**. Journal of Cleaner Production v.180, p. 823-831, 2018.

SILVA, F. M. et al..**Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber**. Construction and Building Materials, v. 91, p. 71–79, 2015.

SILVA, F. M.; ALVES, S. M.; MIRANDA JR., E. J. P.; ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.. **Desempenho físico mecânico e acústico de compósitos cimentícios com materiais alternativos**. In. 49º Congresso Español de Acústica. Tecniacustica, Cadiz, Espanha, 2018.

SIMÕES, Maia Flávio. **Procel edifica – Eficiência energética em edificações: Acústica arquitetônica**. Disponível em: <https://dbcovr.com>. Acesso: 05/09/2019.

SOUSA, A. J. C.. ***Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias.*** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia Universidade do Porto - FEUP, Porto - Portugal, 2010.

TRIOLA, MÁRIO F.; ***Introdução à estatística: atualização da tecnologia.*** 11 ed.. Rio de Janeiro, L.T.C , 2015.

UTEP - Usina de Tratamento Ecológico de Pneus. Disponível em <https://www.utep.com.br/raspa-de-pneus.php>. Acesso em: 22 de setembro de 2019.

Wongsa, A.; Sata, V.; Nematollahi, B.; Sanjayan, J.; Chindaprasirt, P.. ***Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber.*** Journal of Cleaner Production 195 (2018) 1069e1080

YANG, S.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E.A.B. ***Thermal conductivity of crumb-rubber-modified mortar using an inverse meso-scale heat conduction model.*** Construction and Building Materials, v. 212, p. 522–530, 2019.

YOUSSEF, O. ; HASSANLIA, R.; MILLSA, J. E.. ***Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content.*** Journal of Building Engineering, v. 11,p.115–126, 2017.

YU, Y.; ZHU, H.. ***Influence of rubber size on properties of crumb rubber mortars.*** Journal MDPI Materials, v.9, p.527, 2016.

ZÁLESKÁ, M.; PAVLÍK, Z.; ČÍTEK, D.; JANKOVSKÝ, O.; PAVLÍKOVÁ M.. ***Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability.*** Construction and Building Materials. v.225, p. 709–722, 2019.