



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia



AUGUSTO CARLOS GOMES DA SILVA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM FIBRAS DE
AÇO, VERMICULITA E BORRACHA

LIMEIRA

2023

AUGUSTO CARLOS GOMES DA SILVA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM FIBRAS DE
AÇO, VERMICULITA E BORRACHA

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

Orientadora: Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz.

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO AUGUSTO
CARLOS GOMES DA SILVA, E ORIENTADA
PELA PROFA. DRA. ROSA CRISTINA
CECCHÉ LINTZ.

LIMEIRA

2023

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

Si38e Silva, Augusto Carlos Gomes da, 1992-
Estudo das propriedades mecânicas de concretos com fibras de aço,
vermiculita e borracha / Augusto Carlos Gomes da Silva. – Limeira, SP : [s.n.],
2023.

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

1. Materiais de construção. 2. Fibras de aço. 3. Vermiculita. 4. Borracha. I.
Lintz, Rosa Cristina Cecche, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Study of the mechanical properties of concretes with steel fibers,
vermiculite and rubber

Palavras-chave em inglês:

Building materials

Steel fibers

Vermiculite

Rubber

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Rosa Cristina Cecche Lintz [Orientador]

Luísa Andréia Gachet

Nádia Cazarim da Silva Forti

Data de defesa: 05-07-2023

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8002-6950>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1388085065061007>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa da dissertação para o Título de Mestre em Tecnologia na área de concentração Ciências dos Materiais, a que se submeteu o aluno Augusto Carlos Gomes da Silva, em 5 de julho de 2023 na Faculdade de Tecnologia - FT/UNICAMP, em Limeira/SP.

Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz
Presidente da Comissão Julgadora

Profa. Dra. Luísa Andréia Gachet
Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas

Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia.

AGRADECIMENTOS

À minha família, Valdecir, Lourdes Tais, Renan e Eduardo, por me ensinarem valores, por todo o apoio e incentivo ao crescimento. Sou grato por tê-los em minha vida. Em especial para minha mãe pelo hábito da leitura, criado na infância, e a meu pai pelo entendimento e pelo incentivo a carreira acadêmica.

A todos os Professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, por desafios, compreensão, paciência, dedicação e competência. Este trabalho não seria possível sem os esforços de vidas e de trabalhadores que atuaram de forma ativa na formação de mentes jovens.

Às amigas que a vida me proporcionou criar e formar uma nova família de Amor Ariane, Vivian, Jéssica, Patrícia, Ana Paula, Erik, Leticia, Thais e Muriele. Vocês tornam um mundo frio em um lugar afável.

Aos amigos encontrados durante o processo de trabalho Lucas Batista, Lucas Pereira, Camila, Denner, Fabiana, por dividirem os fardos, as alegrias, as conquistas e vitórias, os trabalhos, e por me permitirem aprender e as vezes tentar ensinar.

À minha analista Talita, que com sua competência profissional durante o processo terapêutico me ajudou a aprender a viver no oceano selvagem que é minha psique.

À CAPES pelo financiamento da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz pela orientação e supervisão do trabalho, obrigado pela dedicação e gentileza em meu processo de aprendizagem e ao Prof. Dr. Amauri Ernesto Gomes pelo auxílio nos ensaios.

À Profa. Dra. Luísa Andréia Gachet pelos diversos ensinamentos e contribuições dados ao longo desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) pelo apoio e suporte na realização dos ensaios, e aos amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta pesquisa.

Às empresas Belgo Arames, Limercap Pneus e a Mc Bauchemie pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao setor da construção civil tem viabilizado o emprego de materiais não-convencionais na composição do concreto. A incorporação de resíduos de borracha, proveniente de pneus inservíveis, ao concreto reforçado com fibras de aço tem trazido alguns benefícios no estado endurecido do material. Esta pesquisa objetivou o estudo das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras de aço contendo associados vermiculita expandida e resíduos de borracha. Foram estudadas quatro composições de concreto reforçado com fibra de aço: um traço de referência e outros três traços com teor fixo de 30% de vermiculita expandida e teores crescente de 10%, 20% e 30% de resíduos de borracha. Foram realizados ensaios para determinação da consistência no estado fresco dos concretos, e, no estado endurecido foram determinados os parâmetros relacionados à: absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade estático e dinâmico, caracterização acústica. Foi também avaliada a microestrutura do material para melhor compreender o seu comportamento mecânico. Os resultados obtidos indicaram redução das resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade estático e dinâmico de acordo com teores crescentes de borracha nos concretos. Entretanto, observou-se melhora de suas propriedades acústicas. Os traços com 0, 10% e 20% de borracha foram classificados como estruturais. Contudo, o traço com 30% de borracha apresentou desempenho acústico e taxa de amortecimento superior aos demais. Assim, o emprego conjunto na composição do concreto, de fibras de aço, borracha e vermiculita mostrou ser uma opção de material cujo desempenho físico, mecânico e acústico favorece a aplicação em elementos estruturais e não estruturais que necessitem de tais propriedades.

Palavras-chave: Materiais alternativos, vermiculita, resíduos de borracha, fibras de aço.

ABSTRACT

The development of new technologies applied to the civil construction sector has enabled the use of non-conventional materials in the composition of concrete. The incorporation of rubber waste from unusable tires into the material concrete reinforced with steel fibers has brought some benefits in the hardened state of the material. This research aimed to study the mechanical properties of concrete reinforced with steel fibers containing associated expanded vermiculite and rubber waste. Four steel fiber reinforced concrete compositions were studied: a reference mix and three other mixes with a fixed content of 30% expanded vermiculite and increasing levels of 10%, 20%, and 30% of rubber waste. Tests were carried out to determine consistency in the fresh state of the concrete, and, in the hardened state, the parameters related to: water absorption, void ratio, specific mass, compressive and tensile strength, static and dynamic modulus of elasticity, and acoustic characterization. The microstructure of the material was also evaluated to better understand its mechanical behavior. The results obtained indicated a reduction in compressive and tensile strength, and static and dynamic modulus of elasticity according to increasing rubber content in concrete. However, an improvement in its acoustic properties was observed. Traces with 0, 10, and 20% rubber were classified as structural. However, the mix with 30% rubber showed acoustic performance and damping rate superior to the others. Thus, the joint use in the composition of concrete, steel fibers, rubber and vermiculite proved to be a material option whose physical, mechanical and acoustic performance favors the application in structural and non-structural elements that require such properties.

Keywords: Alternative materials, vermiculite, residual rubber, steel fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microscopia eletrônica de varredura de amostra de concreto.....	22
Figura 2: Imagem da partícula de vermiculita expandida, na escala de 10 μm	23
Figura 3: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha, na escala de 50 μm	24
Figura 4: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha não tratada, na escala de 500 μm	24
Figura 5: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com solução 5% NaOH, nas escalas (a) 500 μm (b) 10 μm	25
Figura 6: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com solução 5% KMnO_4 , nas escalas (a) 500 μm (b) 100 μm	25
Figura 7: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com pasta cimentícia, nas escalas (a) 500 μm (b) 100 μm	26
Figura 8: Comportamento típico das curvas tensão-deformação para o concreto e seus principais constituintes.....	27
Figura 9: Módulos de deformação a partir da curva tensão-deformação.....	28
Figura 10: Posição dos transdutores na transmissão direta	32
Figura 11: Posição dos transdutores na transmissão indireta	32
Figura 12: Posição dos transdutores na transmissão semidireta	33
Figura 13: Arranjo do ensaio, transmissão direta: (a) equipamento gerador-receptor de circuito (a) equipamento gerador-receptor de circuito (b) transdutor-emissor (c) transdutor receptor (d) corpo de prova.....	33
Figura 14: Segmentos minerais de vermiculita (a) em estado natural (b) após processo de expansão.....	38
Figura 15: Lacuna na literatura que está sendo estudada nesta pesquisa	52
Figura 16: Fibras de aço empregadas na pesquisa.....	55
Figura 17: Vermiculita expandida.....	56
Figura 18: Borracha proveniente da recauchutagem de pneus, peneirada e passante na peneira de malha #1,2mm e retida na peneira #0,6mm.....	56
Figura 19: Ensaio de caracterização físicas dos materiais componentes dos concretos.....	57

Figura 20: Fluxograma sobre a ordem de entrada dos materiais na betoneira.....	59
Figura 21: Ensaio de abatimento do tronco de cone para os traços ensaiados.....	60
Figura 22: Realização de ensaio para determinação de massa específica, do rendimento e teor de ar pelo método gravimétrico para os traços ensaiados	61
Figura 23: Execução de ensaio de resistência à compressão do traço de referência.....	62
Figura 24: Execução de ensaio de resistência à tração por compressão diametral do traço de referência.....	63
Figura 25: Execução de ensaio de módulo estático do traço de referência.....	64
Figura 26: Execução de ensaio de módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento, seguindo a NBR 8522-2 (ANBT, 2021)	65
Figura 27: Execução de ensaio de caracterização acústica, seguindo a NBR 15630 (ABNT, 2009)	65
Figura 28: Equipamento utilizado na realização do ensaio de microscopia das amostras estudadas nesta pesquisa	66
Figura 29: Curva granulométrica do agregado miúdo natural, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2009)	69
Figura 30: Curva granulométrica do agregado graúdo natural, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2009)	70
Figura 31: Curva granulométrica da vermiculita expandida, seguindo a NBR 11355 (ABNT, 2015)	71
Figura 32: Curva granulométrica do resíduo de borracha, seguindo adaptação da NBR NM 248 (ABNT, 2009)	72
Figura 33: Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias	76
Figura 34: Resultados de resistência à tração por compressão diametral a 7 e 28 dias	77
Figura 35: Resultados de módulo de elasticidade estático, aos 7 e 28 dias	78
Figura 36: Resultados de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e flexional aos 7 e 28 dias	79
Figura 37: Resultados de fator de amortecimento longitudinal aos 7 e 28 dias	80

Figura 38: Resultados de fator de amortecimento flexional aos 7 e 28 dias	80
Figura 39: Resultados de velocidade de propagação de onda e massa específica aos 28 dias	82
Figura 40: Imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura dos concretos na escala de 500 μ m: (a) traço C-0B-0V, (b) traço C-10B-30V, (c) traço C-20B-30V e (d) traço C-30B-30V.....	84
Figura 41: Imagens de ensaio de microscopia eletrônica de varredura dos concretos nas escalas de 100 μ m (a) traço C-0B-0V, (b) traço C-10B-30V, (c) traço C-20B-30V e (d) traço C-30B-30V	85
Figura 42: Teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão aos 28 dias	87
Figura 43: Teste de Tukey para comparação das médias de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	89
Figura 44: Teste de Tukey para comparação das médias do fator de amortecimento aos 28 dias	91
Figura 45: Teste de Tukey para comparação das médias de velocidade de propagação de onda aos 28 dias	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição química média de vermiculitas comerciais brasileiras.....	37
Quadro 2: Resultados de trabalhos de concreto contendo vermiculita expandida	41
Quadro 3: Resultados de trabalhos de concreto contendo resíduos de borracha.....	43
Quadro 4: Resultados de trabalhos de concreto contendo fibras de aço.....	49
Quadro 5: Características físicas e químicas da sílica ativa	54
Quadro 6: Características físicas do aditivo empregado nesta pesquisa	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição dos materiais componentes em massa (kg/m ³) para produção dos concretos utilizados na pesquisa	58
Tabela 2: Quantidades de corpos de prova para cada ensaio, aos 7 e 28 dias	60
Tabela 3: Características físicas cimento CPV-ARI	68
Tabela 4: Características físicas do agregado miúdo	68
Tabela 5: Características físicas do agregado graúdo	69
Tabela 6: Características físicas da vermiculita expandida	71
Tabela 7: Análise química da vermiculita, obtida por meio de espectrometria de energia dispersiva (EDS)	71
Tabela 8: Características físicas do resíduo de borracha	72
Tabela 9: Análise química do resíduo de borracha, obtida por meio de espectrometria de energia dispersiva (EDS)	73
Tabela 10: Valores de abatimento do concreto, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020) ...	73
Tabela 11: Resultados de ensaio para determinação de massa específica, consumo de cimento e teor de ar	74
Tabela 12: Resultados de Absorção de água, índice de vazios e massa específica, realizados aos 28 dias	75
Tabela 13: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de resistência à compressão aos 28 dias	86
Tabela 14: Análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias	86
Tabela 15: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de módulo de elasticidade dinâmico	88
Tabela 16: Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	88
Tabela 17: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de fator de amortecimento	90
Tabela 18: Análise de variância dos resultados de fator de amortecimento aos 28 dias...	90
Tabela 19: Nível de Significância e desvio padrão - resultados da velocidade de propagação de onda aos 28 dias	92
Tabela 20: Análise de variância dos resultados de velocidade de propagação de onda aos 28 dias	92

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Módulo de deformação tangente – Tensão fixa (σ)	29
Equação 2: Módulo de deformação tangente – Deformação específica (ϵ_a)	29
Equação 3: Módulo de deformação secante	29
Equação 4: Determinação do módulo de deformação tangente inicial – Para concretos de $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa	29
Equação 5: Determinação do módulo de deformação tangente inicial – Para concretos de $55 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa	30
Equação 6: Determinação do módulo de deformação tangente inicial pela <i>Fédération internationale du béton - Model Code for Concrete Structures 2010</i> (fib MODEL CODE 2010)	30
Equação 7: Velocidade de propagação de ondas	31
Equação 8: Módulo de elasticidade dinâmico através da propagação ultrassônica em argamassas	31
Equação 9: Módulo de elasticidade do concreto - considerando a geometria, a massa, as dimensões do espécime e a frequência	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Concreto	20
2.1.1 Módulo de elasticidade estático	26
2.1.2 Módulo de elasticidade dinâmico	30
2.1.3 Amortecimento	35
2.2 Compósitos de cimento com vermiculita	37
2.3 Compósitos de cimento com borracha	42
2.4 Compósitos de cimento com fibras de aço	47
2.5 Incorporação do resíduo de borracha, vermiculita e fibras de aço ao concreto ..	51
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.1 Materiais componentes do concreto.....	53
3.1.1 Água de amassamento.....	53
3.1.2 Cimento Portland.....	53
3.1.3 Sílica Ativa	53
3.1.4 Aditivo redutor de água	54
3.1.5 Agregado Miúdo Natural	54
3.1.6 Agregado Graúdo.....	55
3.1.7 Fibras de aço	55
3.1.8 Vermiculita expandida	55
3.1.9 Borracha de pneus.....	56
3.1 Caracterização física dos materiais.....	56
3.2 Produção dos concretos.....	58
3.3 Ensaio no estado fresco dos concretos.....	60

3.3.1	Determinação do Índice de Consistência	60
3.3.2	Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	61
3.4.	Ensaio no estado endurecido do concreto.....	62
3.4.1	Determinação da Absorção de água, índice de vazios e massa específica. 62	
3.4.2	Resistência à Compressão	62
3.4.3	Resistência a tração por compressão diametral	63
3.4.4	Módulo de elasticidade estático.....	63
3.4.5	Módulo de elasticidade dinâmico e fator de amortecimento	64
3.4.6	Caracterização acústica	65
3.4.7	Microscopia de varredura eletrônica (MEV).....	66
3.4.8	Análise estatística	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	Caracterização física dos materiais.....	68
4.1.1	Cimento Portland - CPV-ARI	68
4.1.2	Agregado Miúdo Natural.....	68
4.1.3	Agregado Graúdo.....	69
4.1.4	Vermiculita expandida	70
4.1.5	Resíduo de borracha	72
4.2	Propriedades dos concretos no estado fresco.....	73
4.2.1	Determinação do Índice de Consistência	73
4.2.2	Determinação da massa específica, consumo de cimento e teor de ar de acordo com o método gravimétrico.	73
4.3	Propriedades dos concretos no estado endurecido.....	74
4.3.1	Determinação da Absorção de água, índice de vazios, e massa específica 74	
4.3.2	Resistência à compressão	76

4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral	77
4.3.4 Módulo de elasticidade estático	78
4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico e fator de amortecimento	79
4.3.6 Caracterização acústica	81
4.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	83
4.4 Análise estatística	86
4.4.1 Resistência à compressão	86
4.4.2 Módulo de elasticidade dinâmico	88
4.4.3 Fator de amortecimento	90
4.4.4 Velocidade de propagação de onda	92
4.5 Possíveis aplicações para o material	94
5. CONCLUSÃO	95
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	97
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1. INTRODUÇÃO

Sendo superado apenas pela água, o concreto é o material mais consumido no mundo pelo homem (METHA; MONTEIRO, 2014). Além dos materiais tradicionais que o constitui, cimento Portland, agregados e água, pode fazer parte da sua composição: resíduos, aditivos e adições.

Os agregados leves têm sido bastante empregados com a função de diminuir a densidade do concreto, podendo ser de origem natural ou artificial. A pedra pomes, argila expandida, folhelho, ardósia, vermiculita, perlita são exemplos de agregados leves.

A vermiculita expandida tem sido empregada como agregado leve em argamassas e concretos em substituição total e/ou parcial aos agregados, alterando suas propriedades, resultando na diminuição da densidade dos compósitos, aumentando o índice de vazios e melhorando as características acústicas e térmicas do material (MO et al., 2018; LIU et al., 2022; HASSAN et al., 2023; DORA; BARTA; MINI, 2023).

A incorporação de fibras no concreto, especialmente a fibras de aço, altera suas propriedades nos estados fresco e endurecido. O concreto com fibras de aço têm sido largamente empregado na construção de pisos, pavimentos industriais e comerciais, docas, aeroportos, portos, radiers, tubos de concreto, dentre outros, devido a melhora de algumas de suas propriedades mecânicas (FIGUEIREDO, 2011).

A perda de fluidez da mistura e a melhora de algumas propriedades mecânicas, como tenacidade e amortecimento, são características do concreto com fibras de aço (ATHIYAMAAN; GANESH, 2020; ALFERES FILHO et al., 2019; NARULE; ULAPE, 2023; SRIDHAR; PRASAD, 2019).

Já o emprego de resíduos no ramo da construção civil vem sendo uma alternativa usual. Esta prática foi impulsionada pela criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída no Brasil por meio do projeto de Lei nº 12.305/2010, que dispõe sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos devendo ser observados processos de reciclagem e reutilização,

considerando: a coleta seletiva e a logística reversa, o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas, o monitoramento e a fiscalização ambiental, sanitária e agropecuária, a pesquisa científica e tecnológica e a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado, a educação ambiental, a avaliação de impactos ambientais, o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, destinação e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos.

A incorporação de pneus inservíveis na produção de compósitos cimentícios, como agregado reciclado, tem sido motivada pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 258/1999, alterada pelas Resoluções nº 301/2002 e nº 416/2009, que estabelece que as empresas que comercializam pneus devem se responsabilizar pela coleta e destinação final ambientalmente adequadas dos pneus inservíveis existentes por todo o território nacional. A Resolução nº 416/2009 estabelece que o pneu inservível é aquele que apresenta danos irreparáveis em sua estrutura não podendo ser empregado para rodagem e nem reformado com o propósito de aumentar seu tempo de vida útil. A deposição inadequada do pneu no meio ambiente traz sérios riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Determina-se nesta Resolução que, para que um pneu novo possa ser comercializado, as empresas deverão destinar adequadamente um pneu inservível.

Quando reformado, o pneu, pode se manter em rodagem por um período maior, e o resíduo obtido deste processo de reforma precisa também ser destinado de forma adequada. Para viabilizar a destinação adequada desse resíduo pesquisadores em diversos institutos buscam formas de incorporar o mesmo a materiais e processos já existentes.

A borracha proveniente de pneus inservíveis empregada no setor da construção civil tem sido aplicada na composição de asfalto (NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2023), concreto (MEI et al., 2023) e argamassa (YANG; FAN; XU, 2023), com a finalidade de melhorar o desempenho acústico e amortecimento do material além de agregar benefícios ambientais como: redução do consumo de matéria-prima não renovável e destinação adequada deste passivo ambiental.

São diversos os estudos na literatura que tratam da influência da incorporação de fibras de aço, vermiculita expandida e resíduos de borracha nas propriedades dos

concretos, porém estes três materiais não aparecem associados conjuntamente no concreto como é abordado nesta pesquisa.

Dentro deste contexto, esta pesquisa versa sobre o estudo das propriedades mecânicas em estado fresco e endurecido, de concretos reforçados com fibras de aço contendo associados a vermiculita expandida e os resíduos de borracha provenientes de pneus inservíveis, visando sua aplicação na construção de peças de concreto.

1.1 Objetivo geral

Estudo das propriedades mecânicas de traços de concreto reforçados com fibras de aço contendo associados vermiculita expandida e resíduos de borracha.

1.2 Objetivos específicos

- Proposição de traços de concreto contendo fibras de aço, vermiculita expandida e resíduos de borracha;
- Determinação das características do concreto:
 - nos estados fresco e endurecido;
 - avaliação das propriedades acústicas do concreto;
 - análise da microestrutura dos concretos visando melhor compreender os resultados encontrados nos ensaios mecânicos;
 - análise dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, velocidade de propagação de onda e fator de amortecimento, aos 28 dias, pela análise de variância (ANOVA) e comparação de pares de médias, teste de Tukey.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

O concreto de cimento hidráulico é um material constituído de um meio contínuo aglomerante, formado pelo cimento hidráulico e água, com partículas incorporadas de agregados. O concreto é um material compósito que também pode conter aditivos, adições, fibras e resíduos. Composto por materiais de diferentes naturezas apresentando uma estrutura altamente heterogênea, constituído por três fases distintas: a primeira fase formada pelos agregados, outra pela matriz de pasta cimentícia e a terceira fase, denominada zona de transição, que caracteriza a região interfacial contida entre a fase agregados e a fase pasta cimentícia (METHA; MONTEIRO, 2014).

A interação entre essas três fases tem importância significativa nas características do concreto.

O concreto possui as três características fundamentais: resistência, estabilidade dimensional e durabilidade. Estas são diretamente determinadas pelas características dos agregados e da pasta, as quais estão diretamente relacionadas às características da microestrutura (como a forma que se distribuem os sólidos e os vazios, suas quantidades e seus tipos). A pasta de cimento é formada pelos cristais de C-S-H de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais que se aderem fortemente ao hidróxido de cálcio, ao clínquer anidro e aos agregados (METHA; MONTEIRO, 2014).

Conforme Cincotto (2011) e Mehta e Monteiro (2014) os principais sólidos provenientes do cimento hidratado presentes na pasta são:

- C-S-H - silicatos de cálcio hidratados, que constitui de 50% a 60% do teor volumétrico de sólidos da pasta e apresenta morfologia variável entre um reticulado cristalino e fibras muito pouco cristalinas;

- Ca(OH)_2 - hidróxido de cálcio (portlandita), que compõe de 20 a 25% o teor volumétrico de sólidos da pasta e apresentam morfologia de prismas hexagonais;

- sulfoaluminatos de cálcio, que constitui de 15 a 20% o teor volumétrico de sólidos da pasta cimentícia. Durante os primeiros estágios de hidratação forma o trissulfato hidratado (etringita) sob a forma de cristais prismáticos aciculares.

Eventualmente durante a hidratação as partículas de etringita reagem produzindo monossulfato hidratado sob a forma de lâminas prismáticas hexagonais; e

- grãos de clínquer não hidratado, possui dimensão de 1 a 50 μm cuja morfologia se assemelha à partícula de clínquer original.

A resistência está baseada na parte sólida do concreto, sendo prejudicial a existência de vazios. O aparecimento de vazios depende dos teores de água inseridos aos compósitos cimentícios durante o processo de mistura e do grau de hidratação das partículas de cimento.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) o processo associado a hidratação de concretos hidráulicos ocorrem em três principais etapas:

a) Quando fresco, recém misturado, uma película de água se forma em torno dos agregados, processo conhecido como “efeito parede”, e isso contribui para um aumento na relação água/cimento nessa região próxima ao agregado, e isso vai reduzindo ao se afastar dele em direção a pasta.

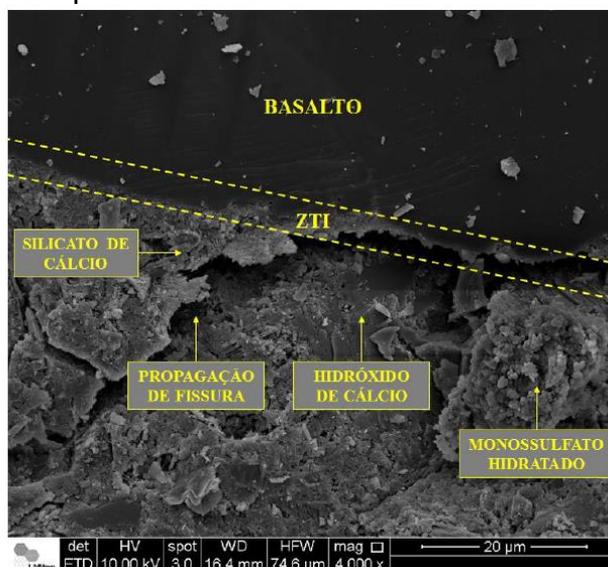
b) Ao dissolver os compostos sulfato de cálcio e aluminato de cálcio são produzidos íons de hidroxila, aluminado, sulfatos e cálcio que reagem para produzir a etringita (C-A- $\bar{\text{S}}$ -H) e hidróxido de cálcio (C-H), considerando-se: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; $\bar{\text{S}}$ = SO₃; H = H₂O. Este fato associado a maior relação água/cimento já relatado nesta região, faz com que esses produtos cristalinos, próximos aos agregados graúdos tendem a apresentar cristais de maior dimensão produzindo uma estrutura com alto índice de porosidade em comparação a pasta. Essas placas de C-H tendem a se orientar perpendicularmente à superfície do agregado, o que ocasiona maior fragilidade nesta região.

c) Com a hidratação se desenvolvendo tem-se a formação de C-S-H com baixa cristalinidade e de C-A- $\bar{\text{S}}$ -H e C-H, os quais preenchem os vazios dos grandes cristais de C-A- $\bar{\text{S}}$ -H e C-H. Isso resulta em maior resistência da zona de transição e maiores densidades.

Mehta e Monteiro (2014) comentam que a fase de transição entre agregado e matriz cimentícia é a área mais frágil do concreto, e nela ocorrem os primeiros sinais irreversíveis quando estes são submetidos a esforços solicitantes, microfissuras e fechamento de poros se forem esforços de compressão, e trincas, se forem esforços de tração ou cisalhamento. Paulon e Kirchheim (2011) estimam a espessura da zona de transição de aproximadamente de 50 μm .

É possível observar na Figura 1, de acordo com Angelin et al. (2020), imagem gerada no ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a interface entre o agregado graúdo basáltico natural e a matriz cimentícia.

Figura 1: Microscopia eletrônica de varredura de amostra de concreto.



Fonte: Angelin et al. (2020).

Com relação a estabilidade dimensional, a pasta de cimento ao ser exposta à umidade ambiente, perde água e retrai. Primeiro a água livre retida nos grandes poros é evaporada para o ambiente sem causar retração significativa ao material. Prosseguindo o processo de secagem da pasta a água adsorvida e a água retida em pequenos capilares causam retração considerável ao sistema (ISAIA, 2011; METHA; MONTEIRO, 2014).

Quanto à durabilidade, a pasta é alcalina e é atacada quando exposta às águas ácidas. Conseqüentemente é desejável que o concreto tenha baixa porosidade e seja o menos permeável possível (METHA; MONTEIRO, 2014).

As pastas típicas de cimento presentes no concreto possuem porosidade capilar de 30% a 40%. Nos agregados convencionais (mármore, granito, basalto, calcário) a porosidade é normalmente abaixo de 3% (METHA; MONTEIRO, 2014).

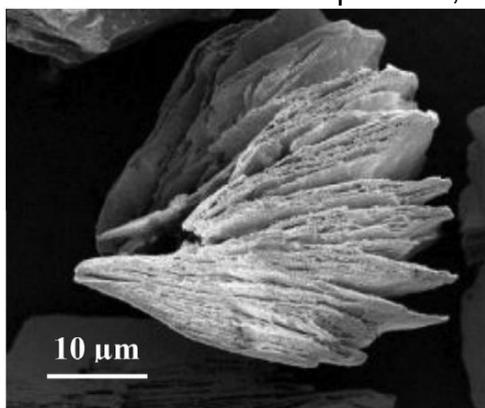
Assim, o concreto composto de pasta e agregados de baixa permeabilidade favorece ao aumento de sua resistência mecânica e durabilidade. Por outro lado, a incorporação de agregados leves (argila expandida, vermiculita expandida, pérolas de isopor) com alta porosidade geram redução da densidade do material, porém

ocasionam o aumento da porosidade na estrutura interna dos concretos (ANGELIN et al., 2020, BECKER et al., 2022).

A estrutura lamelar da vermiculita expandida auxilia na aderência superficial do grão na pasta cimentícia, devido ao baixo efeito parede entre a superfície do agregado e a matriz. Graças a superfície porosa do grão de vermiculita, a pasta cimentícia tende a penetrar nas camadas mais superficiais do agregado. Porém, quanto mais a pasta adentra em direção ao núcleo do grão, maior é a dificuldade encontrada, fazendo com que o núcleo do agregado tenha maiores índices de vazios (RASHAD, 2016; KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015).

Na Figura 2, Rashad (2016) apresenta uma imagem de partícula de vermiculita expandida, obtida por meio do ensaio de MEV.

Figura 2: Imagem da partícula de vermiculita expandida, na escala de 10 μm .



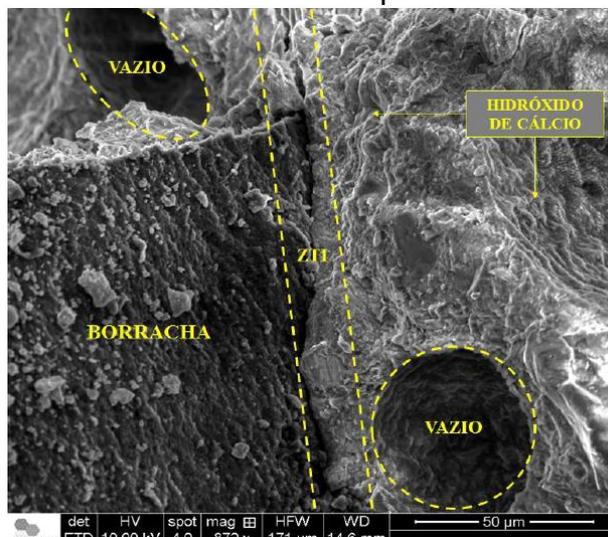
Fonte: Rashad (2016).

O emprego de resíduo de borracha, proveniente da indústria automobilística, em compósitos cimentícios impacta diretamente as características do material, no estado fresco e também após o processo de cura devido principalmente a sua característica de material hidrofóbico. A incorporação de borracha nos compósitos também ocasiona maiores teores de vazios e zona de transição fragilizada (ASSAGGAF et al., 2021; ANGELIN et al., 2020).

Conforme apresentado por Angelin et al. (2020) o resíduo de borracha possui uma superfície irregular, áspera e antiaderente, devido ao material constituído por zinco utilizado na fabricação dos pneus. Desta forma as partículas de borracha não possuem aderência a matriz das argamassas cimentícias, propiciando o aparecimento de microfissuras e conseqüentemente reduzindo as resistências mecânicas do

concreto. Na Figura 3 está a imagem de MEV, evidenciando a pasta de cimento e a partícula de borracha.

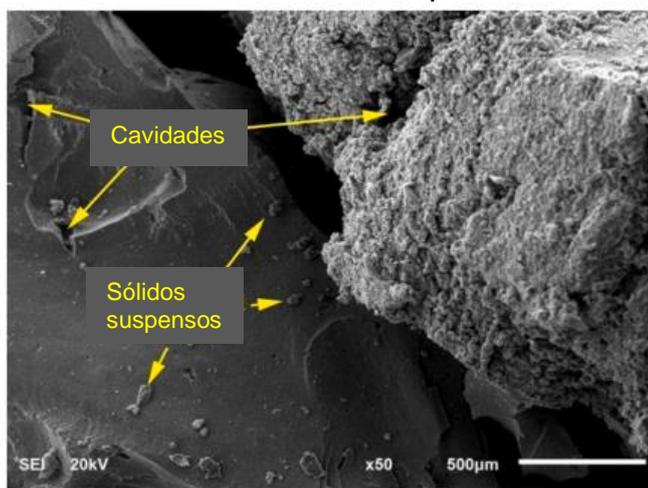
Figura 3: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha, na escala de 50 μm .



Fonte: Angelin et al. (2020).

A fim de minimizar os efeitos gerados pela baixa aderência borracha-pasta, alguns métodos de tratamento da superfície da borracha vêm sendo amplamente estudados por diversos pesquisadores. Em trabalho desenvolvido por Assaggaf et al. (2022) observam-se imagens de borracha não tratada e tratada por três métodos diferentes. Na Figura 4 está apresentada a imagem do compósito cimentício onde aparece a borracha sem tratamento.

Figura 4: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha não tratada, na escala de 500 μm .

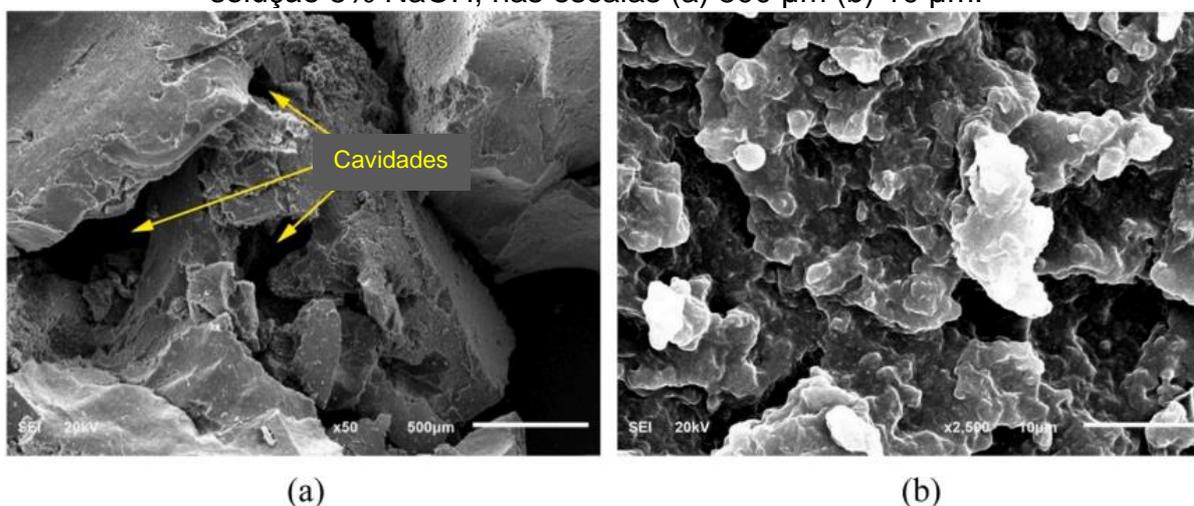


Fonte: Assaggaf et al. (2022).

Na Figura 5 está apresentada uma imagem da borracha tratada com solução 5% NaOH e na Figura 6 observa-se a partícula de borracha tratada com solução 5% KMnO_4 . Na Figura 7 a borracha foi tratada com uma pasta, mistura água-cimento com teor de 0,40 a qual foi aplicada sobre as partículas de borracha.

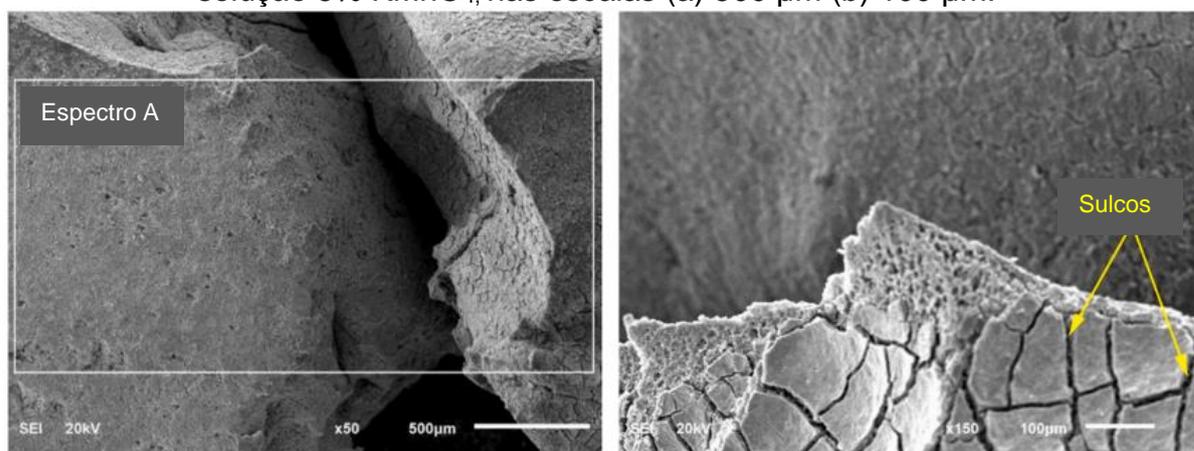
Assaggaf et al. (2022) relataram que: (i) o tratamento com NaOH foi o mais eficiente para remover impurezas e sólidos suspensos da superfície da borracha; (ii) o tratamento com KMnO_4 criou uma nova camada áspera de manganês na superfície da borracha repleta de sulcos e (iii) estatisticamente o método que resultou em melhora das propriedades do material foi o revestimento de pasta de cimento.

Figura 5: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com solução 5% NaOH, nas escalas (a) 500 μm (b) 10 μm .



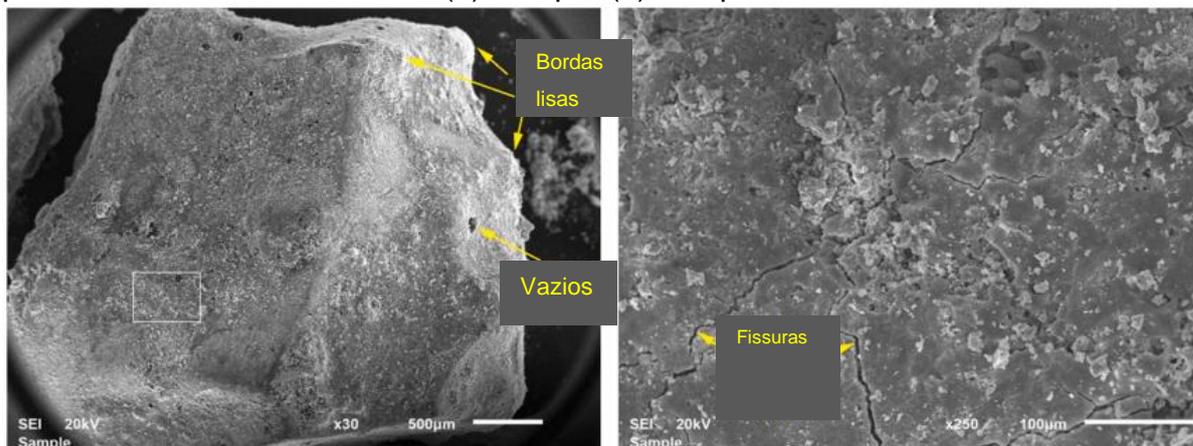
Fonte: Assaggaf et al. (2022).

Figura 6: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com solução 5% KMnO_4 , nas escalas (a) 500 μm (b) 100 μm .



Fonte: Assaggaf et al. (2022).

Figura 7: Imagem de MEV do compósito com partícula de borracha tratada com pasta de cimento, nas escalas (a) 500 μm (b) 100 μm .



Fonte: Assaggaf et al. (2022).

As pesquisas sobre compósitos cimentícios com resíduos, em geral, tem por finalidade analisar o comportamento do material em relação ao seu desempenho mecânico para melhor aplicá-lo no setor da construção civil.

Em relação a resistência à compressão, o concreto é classificado segundo sua massa específica, a resistência à compressão e consistência pela NBR 8953 (ABNT, 2015). É considerado concreto normal (C) aquele com massa específica, após processo de cura e em estado seco entre 2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3 , concreto leve (CL) cuja massa específica seca é inferior a 2000 kg/m^3 e concreto pesado (CD) cuja massa específica seca é superior a 2800 kg/m^3 . São consideradas duas classes de resistência à compressão, Grupo I, concretos de classe C20 a C50 e Grupo II, concretos de classe C55 a C100. Quanto à consistência são consideradas as classes: S10, S50, S100, S160 e S220.

Dentre as diversas propriedades mecânicas do concreto, nesta seção serão abordadas algumas considerações sobre o módulo de elasticidade e o amortecimento, uma vez que estes são objetos de estudo desta pesquisa.

2.1.1 Módulo de elasticidade estático

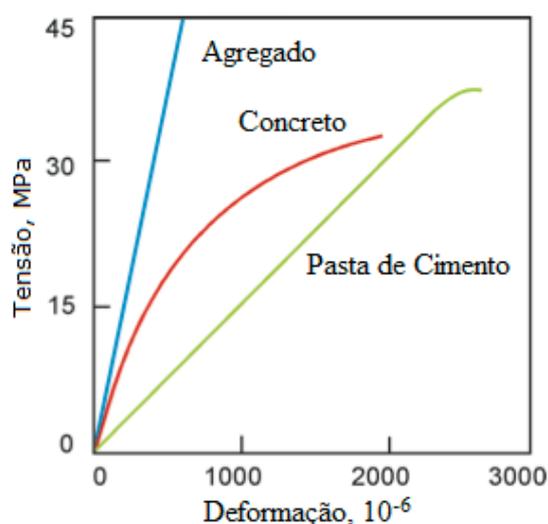
Segundo Callister e Rethwisch (2015) a rigidez de um material é a capacidade do mesmo de se deformar para absorver uma força aplicada sobre ele.

A rigidez pode ser estimada pela medida das propriedades elásticas do material. O ensaio de módulo de elasticidade se caracteriza pela correlação entre a tensão que é aplicada ao material e a medida da deformação instantânea do mesmo, isso delimitado por um intervalo de proporção assumido. Na Figura 8, verifica-se o comportamento elástico linear da pasta cimentícia e do agregado, diferenciando-se do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) em compósitos cimentícios cuja estrutura interna é heterogênea (mistura de agregados em meio ao aglomerante hidráulico) o comportamento elástico depende de fatores diversos, influenciados pela fração volumétrica, módulo de deformação dos agregados, fase zona de transição e massa específica.

O índice de vazios ou teor de poros da matriz cimentícia, do agregado e da zona de transição, age de forma determinante na rigidez do material pois afeta diretamente a capacidade do material de conter as deformações (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 8: Comportamento típico das curvas tensão-deformação para o concreto e seus principais constituintes.



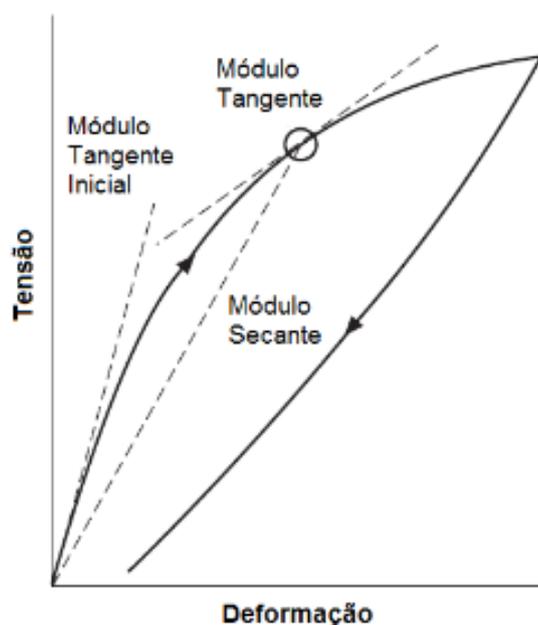
Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Conforme Mehta e Monteiro (2014) para que se possa analisar o módulo de elasticidade estático deve-se analisar a curva de tensão-deformação na região de declividade. O concreto possui essa região não-linear, sendo empregados três métodos para caracterização dos módulos (SHEHATA, 2011):

- **Tangente** – é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão-deformação de compressão;
- **Secante** – é obtido através da inclinação de uma linha reta traçada da origem a um ponto da curva que corresponde à tensão entre 40% e 50% da resistência à compressão;
- **Cordal** – é definido pela reta traçada entre dois pontos quaisquer da curva tensão-deformação. Considera-se o primeiro ponto aquele correspondente a deformação longitudinal a $50 \mu\text{m/m}$, e o segundo o ponto aquele que apresenta 40% da carga última.

A Figura 9, representa graficamente os diferentes módulos de deformação segundo Almeida (2012).

Figura 9: Módulos de deformação a partir da curva tensão-deformação.



Fonte: Almeida (2012).

O teste para determinação do módulo de deformação estático do concreto no Brasil, é regulamentado pela norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021), utiliza corpo de prova cilíndrico, de relação altura/diâmetro igual 2, submetido a esforço de compressão cuja deformação é mensurada por medidores de deformações mecânicos.

Segundo a NBR 8522-1 (ABNT, 2021) são indicadas duas metodologias de carregamento (tangente inicial ou secante):

a. Módulo de deformação tangente:

$$\text{Tensão } \sigma_a \text{ fixa: } E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Deformação específica } \varepsilon_a \text{ fixa: } E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Equação 2})$$

b. Módulo de deformação secante:

$$E_{cs} = \frac{\sigma_n - \sigma_a}{\varepsilon_n - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

σ_b = tensão maior, considerada como 30 % da resistência à compressão (MPa);

σ_n = tensão especificada, expressa em MPa;

σ_a = tensão de 0,5 MPa ou a tensão correspondente à deformação específica de 50×10^{-6} ;

ε_n = deformação específica de cada corpo de prova sob a tensão especificada;

ε_a = deformação específica de cada corpo de prova sob a tensão de 0,5 MPa ou a deformação específica de 50×10^{-6} ;

ε_b = deformação específica do concreto sob σ_b ;

Outras formas de se obter o módulo de deformação do concreto é por meio de equações que correlacionam a resistência à compressão com o módulo de deformação, como por exemplo:

- Determinação do módulo de deformação tangente inicial pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

Para concretos de $20 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 4})$$

Para concretos de $55 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 5})$$

- Determinação do módulo de deformação tangente inicial pela *Fédération internationale du béton - Model Code for Concrete Structures 2010* (fib MODEL CODE 2010):

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $1,0$ para granito e gnaisse; $0,9$ para calcário; $0,7$ para arenito.

Segundo Yue et al. (2021), Li et al. (2021), esta metodologia de ensaio apresenta alguns pontos fracos, que podem ocasionar certa variância sobre os resultados. Essas variâncias são atribuídas a: (i) interferências ocasionadas pelo aparato que mede as deformações no ensaio, pois o mesmo pode ter desprendimento durante a leitura, devido a microfissuras e vazios; (ii) possíveis defeitos existentes na superfície cilíndrica do corpo de prova; (iii) ou falta de paralelismo entre as faces onde é aplicada a tensão, podendo prejudicar a deformabilidade, e conseqüentemente a leitura da mesma.

2.1.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico do concreto (E_{cd}) pode ser determinado por ensaios não destrutivos (PACHECO et al., 2014; NEVILLE, 2016). Os ensaios usualmente empregados são baseados na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas ou nas frequências naturais de vibração.

A norma NBR 8802 (ABNT, 2019) especifica a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônica em corpos de prova de concreto, por meio da Equação 7:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica, em m/s;

L = distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (m);

t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, em s.

A norma NBR 15630 (ABNT, 2009), especifica o ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica, para argamassas.

$$E_d = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

E_d = Módulo dinâmico, em MPa;

v = velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/μs;

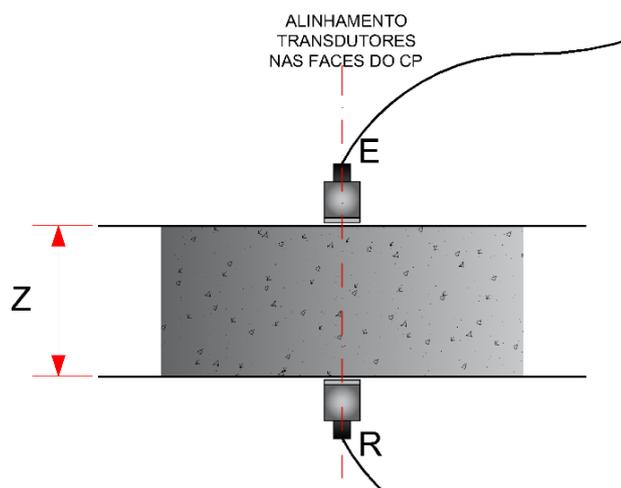
ρ = densidade de massa aparente do corpo de prova, em kg/m³;

μ = coeficiente de Poisson (a norma sugere adotar 0,2).

A norma NBR 8802 (ABNT, 2019) emprega os seguintes arranjos na realização deste ensaio:

- Transmissão direta - o posicionamento dos transdutores é feito em faces opostas do corpo de prova ou superfície de concreto, conforme representado na Figura 10. Este, segundo a normativa, é o posicionamento mais recomendado para a realização do ensaio, devido a maior intensidade com que as ondas são recebidas pelo transdutor.

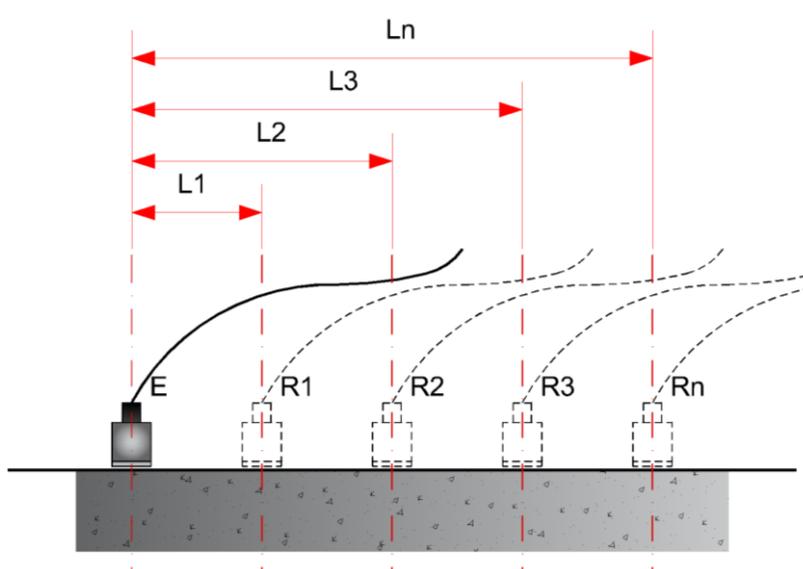
Figura 10: Posição dos transdutores na transmissão direta.



Fonte: Adaptado de NBR 8802 (ABNT, 2019).

- Transmissão indireta - este arranjo é utilizado quando só se tem acesso a uma das faces da superfície de concreto a ser ensaiada, segundo normativa. Conforme o que está representado na Figura 11, deve-se fixar um transdutor-emissor em um ponto denominado E, logo após realiza-se então as leituras nos pontos R1, R2, R3..., Rn, de maneira equidistante entre si, sobre uma mesma reta que contenha o ponto emissor e receptor.

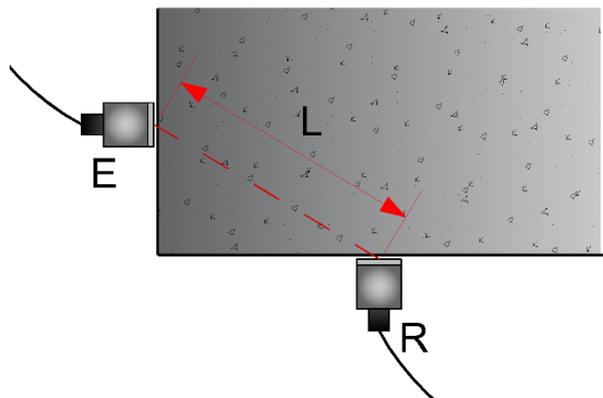
Figura 11: Posição dos transdutores na transmissão indireta.



Fonte: Adaptado de NBR 8802 (ABNT, 2019).

- Transmissão semidireta - este tipo de arranjo é utilizado quando não houver como acessar faces opostas de um corpo de prova, e quando não houver comprimento suficiente na face com acesso para se utilizar o método de arranjo de transmissão indireta (Figura 12).

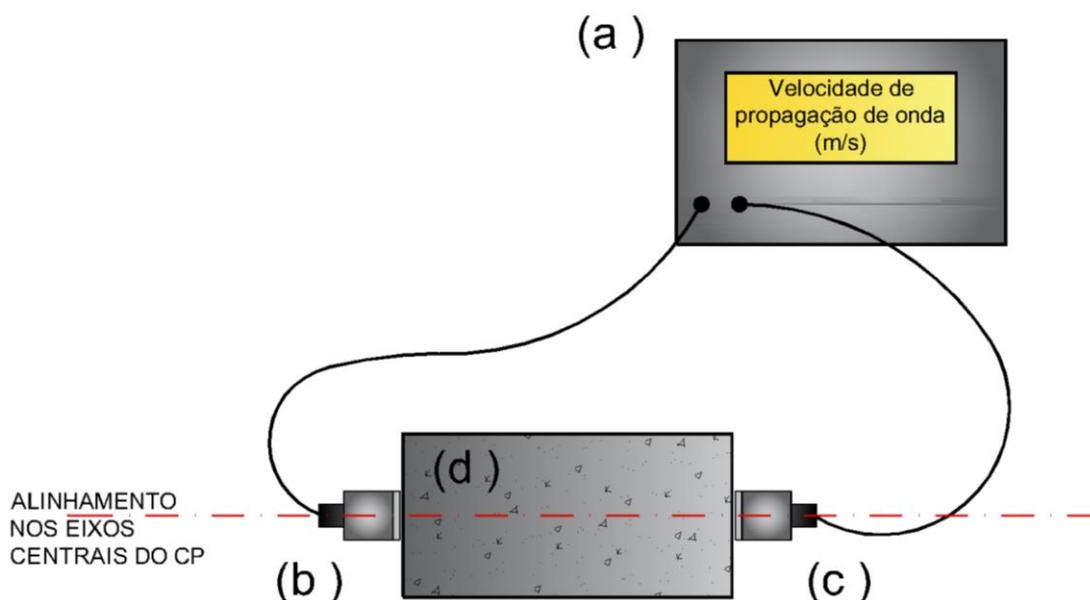
Figura 12: Posição dos transdutores na transmissão semidireta.



Fonte: Adaptado de NBR 8802 (ABNT, 2019).

Na Figura 13 está apresentado o arranjo do ensaio realizado nesta pesquisa.

Figura 13: Arranjo do ensaio, transmissão direta: (a) equipamento gerador-receptor de circuito (b) transdutor-emissor (c) transdutor receptor (d) corpo de prova.



Fonte: Autor (2023).

Quanto às possíveis aplicações do ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônica em concretos, o Anexo D da NBR 8802 (ABNT, 2019) sugere:

- determinação do módulo de elasticidade dinâmico para concretos, pelas ondas longitudinais e/ou transversais;
- determinação da resistência à compressão dos concretos, por meio da construção da curva de correlação obtida a partir dos ensaios realizados segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), versus o resultado do ensaio de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônica, utilizando tratamento estatístico apropriado;
- monitoramento das propriedades dos concretos durante seu tempo de vida útil;
- estimação da profundidade das fissuras, e outras possíveis imperfeições.

Segundo Gencel et al. (2021) o método de ultrassom é eficiente para observar o aumento de vazios em compósitos cimentícios. No estudo realizado pelos pesquisadores sobre o emprego de resíduos de concreto reciclado em substituição ao agregado graúdo e de cinzas volantes em substituição ao cimento, foi verificado que houve redução na resistência à compressão, módulo dinâmico e velocidade de propagação de onda ultrassônica do material devido ao aumento da porosidade causado pela substituição do agregado graúdo.

Yildirim e Sengul (2011) relataram em seus estudos uma relação forte entre o módulo de elasticidade estático e o obtido através da velocidade de pulso ultrassônico. O método não destrutivo também pode ser utilizado para analisar o módulo de elasticidade estático em estruturas existentes, onde a remoção de corpos de prova para os métodos destrutivos não é uma opção viável.

Nesta pesquisa este ensaio foi utilizado para determinar o desempenho acústico dos concretos por meio da velocidade de propagação de ondas, como também observado na literatura pelos pesquisadores:

- Mohammed, Adamu e Shahir (2018); Wang, Wu e Cheng (2022); Latelier et al. (2023) que estudaram o desempenho acústico de compósitos cimentícios pela substituição parcial do agregado miúdo pela borracha;

- Hedjazi e Castillo (2020); Rabehi, Rabehi e Omrane (2023); Hedjazi e Castillo (2020) que ensaiaram traços de concreto contendo como adição fibras de aço;
- Dora, Barta e Mini (2023); Koksai, Sahin e Gencel (2020) os quais estudaram traços de argamassa contendo, como substituição parcial do agregado miúdo, vermiculita expandida.

Em 2021 foi publicada a norma NBR 8522-2 (ABNT, 2021) baseada na norma ASTM E1876-21, que versa sobre o método de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto pelo método das frequências naturais de vibração. O método consiste em apoiar o corpo de prova nas linhas nodais do modo de vibração flexional fundamental, excitar por impacto mecânico este corpo de prova, captar a resposta por um captador acústico, aplicar um tratamento matemático (Transformada Rápida de Fourier) para a obtenção do espectro de frequências e por fim, calcular, por meio da Equação 9, o módulo de elasticidade do concreto, considerando a geometria, a massa, as dimensões do espécime e a frequência (ALVES; OTANI, 2022).

$$E_{cd} = 1,6067 \cdot \left(\frac{h^3 \cdot m \cdot f_f^2}{d^4} \right) \cdot T \cdot 10^{-9} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

E_{cd} , é o módulo de elasticidade dinâmico, em GPa;

h , é a altura do corpo de prova, em mm;

d , é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

m , é a massa do corpo de prova, em g;

f_f , é a frequência de ressonância flexional fundamental, em Hz;

T , é o fator de correção para o modo de vibração flexional fundamental (adimensional).

2.1.3 Amortecimento

A mesma “técnica de excitação por impulso” empregada na determinação do módulo de elasticidade dinâmico utiliza o equipamento Sonelastic® e permite a caracterização simultânea do amortecimento.

Segundo Mei e Wang (2020) o amortecimento é a capacidade de um material de dissipar energia em seu sistema interno vibratório. É de fundamental importância para controlar a amplitude de resposta sob a ressonância do estado estacionário em excitação aleatória. O amortecimento está associado a microestrutura interna dos materiais, e pode ser afetado pela presença de vazios, fissuras e microfissuras.

Mei et al. (2023) abordam sobre como o amortecimento exerce um papel crucial ao estabelecer uma fronteira entre a estabilidade e a instabilidade, quando se analisa um sistema dinâmico. Os pesquisadores observam que o amortecimento é uma propriedade de grande influência em estruturas de concreto expostas a abalos sísmicos, como túneis subterrâneos, ou fundações em locais que estão sujeitos a esses abalos. E, por meio de análise microscópica do concreto realizada mostram que o aumento da zona de transição entre a borracha e a matriz cimentícia melhorou o amortecimento e possibilitou um concreto mais estável para o isolamento de vibrações sísmicas.

Para a determinação do amortecimento de um material são utilizados dois métodos: método do decremento logarítmico e o método da largura de meia banda de potência. Nesta pesquisa utilizou-se o método do decremento logarítmico por meio da “técnica de excitação por impulso” associada ao equipamento Sonelastic®.

Nesta pesquisa, este ensaio foi utilizado para determinar o fator de amortecimento dos concretos como também observado na literatura pelos pesquisadores:

- Hassalani, Youssf e Mills (2017); Li et al. (2019); Habib, Yildirim e Eren (2020) se propuseram a estudar o fator de amortecimento em concretos e argamassas contendo a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de borracha;

- Sridhar e Prasad (2019) estudaram o fator de amortecimento em concretos contendo como adição fibras de aço.

2.2 Compósitos de cimento com vermiculita

A vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar, contendo ferro, magnésio, potássio e alumina com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. A denominação vermiculita provém do latim *vermiculus* (vermes) devido ao movimento das partículas do mineral ao ser exposto às altas temperaturas (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).

A composição química média de vermiculitas comerciais brasileiras estão apresentadas no Quadro 1. Esta composição se refere a vermiculita de Santa Luzia (PB), Sancrelândia (GO) e Massapê (PI).

Quadro 1: Composição química média de vermiculitas comerciais brasileiras.

Compostos (%)	
SiO ₂	40,4 a 45,10
MgO	18,3 a 23,60
Al ₂ O ₃	6,8 a 13,0
Fe ₂ O ₃	5,80 a 8,50
K ₂ O	0,50 a 4,60
Na ₂ O	0,10 a 2,50
CaO	0,56 a 3,60
MnO	0,11 a 0,12
TiO ₂	0,70 a 1,0
NiO	0,21 a 0,29
BaO	0,20
Cr ₂ O ₃	0,31 a 0,45
H ₂ O (total)	10,20 a 15,80

Fonte: Adaptado de Ugarte; Sampaio; França (2005).

A vermiculita é um mineral que apresenta grãos brilhantes que são membros do subgrupo mineral dos filossilicatos, formada sob condições naturais como alteração hidrotermal da biotita ou intemperismo de flogopita (RASHAD, 2016).

Na Figura 14 estão alguns exemplos do mineral em estado natural (antes da expansão) e após o processo completo de expansão. O segundo tipo corresponde ao material utilizado nesta pesquisa.

Figura 14: Segmentos minerais de vermiculita (a) em estado natural (b) após processo de expansão.



Fonte: Rashad (2016).

O processo de esfoliação ou expansão térmica da vermiculita ocorre em fornos a uma temperatura na faixa de 800°C a 1100°C. Durante o aquecimento a água interlamelar é convertida em vapor e expande a vermiculita em até 30 ou 40 vezes o seu volume original. A vermiculita expandida possui características como: baixa massa específica, alta resistência ao fogo, isolante térmica e acústica e elevada porosidade. É empregada no setor da construção civil, na agricultura, nas indústrias química, de tintas, etc. (BINICI et al., 2020; SUVOROV; SKURIKHIN, 2003; UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).

A incorporação da vermiculita expandida em compósitos de cimento alteram algumas de suas propriedades tanto no estado fresco como endurecido, tais como: diminuição da massa unitária, das resistências à compressão, à tração e módulo de elasticidade; incremento da absorção de água, porosidade, fluidez, desempenho térmico e acústico (KOKSAL et al., 2015; MO et al., 2018; KARATAS et al., 2019).

Koksal, Gencil e Kaya (2015) ensaiaram argamassas produzidas com vermiculita (relação vermiculita/cimento, em volume, $v/c=4$, $v/c=6$, $v/c=8$) e sílica ativa (0%, 5%, 10% e 15%) às temperaturas elevadas e ambiente. Os pesquisadores constataram que:

(a) para teores crescentes de vermiculita houve aumento da fluidez das argamassas para as misturas que não continha sílica ativa (na faixa de 105 e 130 mm). Em misturas com sílica ativa ocorreu a redução da fluidez;

(b) As massas unitárias das argamassas no estado endurecido variaram entre 1200 e 780 kg/m³. Os menores valores desta propriedade foram obtidos para os teores de v/c=8. Para teores crescentes de sílica ativa ocorreu uma tendência de aumento da massa unitária de até 14,5%;

(c) a porosidade das argamassas aumentou com o teor crescente de vermiculita em até 43,2%, mas diminuiu com a adição de sílica ativa em até 28,9%;

(d) a absorção de água, teve um crescimento de 40,6% para o teor v/c=8. Para as misturas com 15% de sílica ativa houve diminuição na absorção de água em até 34,6%;

(e) ocorreu diminuição da velocidade de pulso ultrassônico com o crescente teor de vermiculita, estando este valor na média de 2350 m/s. Com a redução da porosidade das argamassas pela adição de sílica ativa observa-se crescimento da velocidade de pulso ultrassônico;

(f) as resistências à compressão variaram de 3,9 MPa a 16,4 MPa à temperatura ambiente. Estas propriedades, bem como a resistência à flexão foram reduzidas com teores crescentes de vermiculita;

(g) os coeficientes de condutividade térmica das argamassas indicaram uma diminuição para teores crescentes de vermiculita até 0,257 W/mK (v/c=8), o que significa um incremento de 58,2% no desempenho térmico. Os pesquisadores concluíram que argamassas produzidas com vermiculita expandida é um bom material sendo resistente ao fogo.

Mo et al. (2018) estudaram argamassas com 30% e 60% de vermiculita em substituição parcial à areia e verificaram que: (a) teve aumento da absorção de água e da fluidez; (b) houve redução da massa unitária e da resistência à compressão de acordo com a incorporação de teores crescentes de vermiculita nas misturas. A vermiculita expandida teve efeito positivo em conferir resistência ao calor e estabilidade térmica às argamassas, observada pela redução da perda de resistência à compressão das argamassas quando estas foram expostas às altas temperaturas.

Liu et al. (2022) ensaiaram amostras de concreto celular com 10%, 15% e 20% de vermiculita expandida em substituição a areia, expostas a 300°C, 600°C e 900°C e constataram que: (a) houve melhor aderência da zona de transição interfacial devido a maior absorção de água dos grânulos de vermiculita expandida; (b) concretos com 15% de vermiculita expandida reduziu a perda de resistência à compressão das

amostras em 1,84%, 11,68% e 69,1% a 300°C, 600°C e 900°C respectivamente, em comparação com o traço de referência, que foi de 9,81%, 33,7% e 72,28%, respectivamente; (c) notou-se menor porosidade residual em temperaturas elevadas.

Naveenkumar et al. (2021) estudaram o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com vermiculita em substituição a areia nos teores de 5% e 10%. Os pesquisadores concluíram que 5% de vermiculita foi o teor ótimo que resultou em redução de apenas 10% da resistência obtida para a viga de referência.

No Quadro 2 está apresentado um resumo dos valores obtidos nos ensaios dos trabalhos comentados acima, sobre compósitos cimentícios com vermiculita expandida realizados por diferentes pesquisadores.

Quadro 2: Resultados de trabalhos de concreto contendo vermiculita expandida.

Autores Material estudado	Teor de vermiculita expandida (%)	Relação a/c	Densidade (kg/m³)	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Fator de Amortecimento	Velocidade de Propagação de onda (m/s)
Mo <i>et al.</i> (2018) Argamassa	0 0 30 60	0,52 0,71 0,52 0,52	2023,00 1991,00 1774,00 1485,00	155 225 175 170	34,00 14,00 16,00 12,00	-	-	-	-
Liu <i>et al.</i> (2022) Concreto	0 1,30 2,00 2,90	0,38 (com aditivo S.P. 0,3% - 0,37%)	1585,50 1512,60 1476,30 1440,00	200 200 180 195	19,88 17,38 15,76 13,34	3,57 2,99 2,76 2,38	-	-	-
Hassan <i>et al.</i> (2023) Argamassa	0 100	0,49 0,60 (sem aditivo)	-	120 85	43,50 9,21	2,65 0,80	-	-	-
Dora; Barta e Mini (2023) Concreto	0 5 10	0,30 (com aditivo)	1600,00 1200,00 1000,00	-	9,00 5,00 4,00	0,35 0,30 0,27	-	-	3400,00 2500,00 1500,00
Koksal; Sahin e Gencel (2020) Concreto	0,70 0,76 0,80	0,70 0,83 0,88 (sem aditivo)	600,00 400,00 250,00	-	3,70 1,10 0,30	-	-	-	1900,00 1400,00 1200,00

Fonte: Autor (2023).

2.3 Compósitos de cimento com borracha

De acordo com Resolução nº 416/2009 do CONAMA, o pneu ou pneumático novo é constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais, caracterizado como um material “que não sofreu qualquer uso, nem foi submetido a qualquer tipo de reforma e não apresenta sinais de envelhecimento nem deteriorações”. O pneu reformado é aquele que foi submetido a processos de reutilização da carcaça para aumentar sua vida útil, tais como: recapagem (substituição da banda de rodagem do pneu), recauchutagem (substituição da banda de rodagem e dos ombros do pneu), e remoldagem (substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos). O pneu inservível é aquele que apresenta danos irreparáveis e devem ser destinados adequadamente evitando riscos à saúde pública e à segurança, de forma a minimizar os impactos ambientais. Estes devem ser descaracterizados de sua forma inicial e seus componentes devem ser reaproveitados, reciclados ou processados.

Segundo o Relatório Ambiental 2020 da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), o Brasil é o 7º produtor mundial na categoria de pneus para automóveis e o 5º em pneus para caminhões e ônibus. Do período de 1999 até 2020 foram coletados 1,1 bilhão de pneus de passeio, provenientes de mais de 1053 pontos de coleta distribuídos pelo Brasil. Os pneus inservíveis são destinados para diversos fins, tais como: combustível em fornos de cimenteiras, fabricação de percintas, solas de calçados, dutos de águas pluviais, na composição de asfalto borracha, tapetes para automóveis, pisos industriais e pisos para quadras poliesportivas, além do emprego do aço dos pneus em siderurgias.

A utilização de pneu inservível na composição de compósitos como agregado reciclado tem sido estudada por diversos pesquisadores (SILVA et al., 2019; ANGELIN et al., 2020; SILVA et al., 2017; LINTZ et al., 2021; LI et al., 2019)

A borracha ao ser empregada na composição de concretos e argamassas diminuem sua massa específica e resistências mecânicas (à compressão, à tração e módulo de elasticidade) (THOMAS; GUPTA, 2016; GUO et al., 2017; ABDELALHEEM; ISMAIL; HASSAN, 2018; HE et al., 2021; ASSAGGAF et al., 2022). Por outro lado, aumenta a capacidade de absorção de energia do material e melhora as propriedades

acústicas do material (ALIABDO et al., 2015; ABDELALEEM; ISMAIL; HASSAN, 2018; LI et al., 2019; ANGELIN et al., 2019; AKBARI et al., 2022).

Em trabalho desenvolvido por Gomes; Lintz; Gachet (2020) foi possível verificar que a borracha ao ser incorporada em argamassa reduz a condutividade térmica melhorando o isolamento térmico do material.

No Quadro 3 estão apresentados alguns trabalhos que tratam sobre as propriedades de concretos com borracha realizados por diferentes pesquisadores.

Quadro 3: Resultados de trabalhos de concreto contendo resíduos de borracha.

Autores	Teor de borracha (%)	Relação a/c	Densidade (kg/m ³)	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Fator de Amortecimento	Velocidade de Propagação de onda (m/s)
Akbari et al. (2022)	0	0,42 (0,5% S.P.)	1756,00	90	42,10	3,40	27,40	-	-
Concreto	5		1748,40	105	42,80	3,23	25,60		
	10		1739,00	110	37,40	2,84	22,40		
	15		1733,50	125	32,50	2,60	19,90		
	20		1725,30	130	29,90	2,50	18,10		
Lin et al. (2023)	5	0,40 (sem aditivo)	-	-	44,00	5,60	38,00	-	-
Concreto	10				39,00	5,10	36,00		
	15				37,00	4,90	34,00		
Meyyappan et al. (2023)	0	0,46 (sem aditivo)	-	100	33,84	3,42	-	-	-
Concreto	5			90	32,09	3,21			
	10			90	30,06	3,09			
	15			85	26,12	2,88			
	20			85	21,27	2,64			
Sidhu e Siddique (2022)	0	0,28 (com 1,8% de S.P.)	2450,00	90	114,00	6,20	45,78	-	-
Concreto	5		2430,00	70	90,00	5,90	37,66		
	10		2400,00	55	69,00	5,20	29,85		
	15		2350,00	39	66,00	4,00	27,66		
	20		2320,00	30	62,00	3,90	26,38		
	25		2290,00	18	45,00	3,70	17,26		
30	2190,00	2	40,00	3,10	13,58				
Hassalani; Youssf e Mills (2017)	0	0,50 (sem aditivo)	-	-	-	-	-	1,8%	-
Concreto	6							1,9%	
	12							2,2%	
	18							2,3%	

Li et al. (2019)	0 30* (10) 60* (20) 90 (30)	0,35 (com aditivo 5,4%)	-	630 615 610 590	43,00 36,40 32,70 28,60	-	18,3 16,25 14,20 12,15	0,38% 0,45% 0,54% 0,62%	-
Habib; Yildirim e Eren (2020)	0 15 25	0,18	2312,00 2191,00 2139,00	81 67 64	96,77 68,50 55,07	6,77** 5,68** 4,88**	60,06 44,66 42,93	1,538% 2,565% 2,936%	-
Mohammed; Adamu e Shahir (2018)	0 10 20 30	0,36 (sem aditivo)	2372,00 2279,00 2224,00 2167,00	-	-	-	55,40 43,62 35,53 19,52	-	5090,00 4683,00 4213,00 3165,00
Wang; Wu e Cheng (2022)	0 5 10 15 20	0,5 (com 2% de aditivo S.P.)	2430,00 2404,00 2378,00 2351,00 2325,00	226 214 206 201 192	-	-	-	-	4125,00 4000,00 3625,00 3375,00 3125,00
Latelier et al. (2023)	0 10 15	0,67 (sem aditivo)	1950,00 1800,00 1720,00	-	-	-	-	-	4200,00 2800,00 2500,00

* kg/m³

** tração na flexão

Fonte: Autor (2023).

Pela análise dos estudos apresentados no Quadro 3, pode-se constatar para concretos contendo resíduos de borracha, que:

- As pesquisas que não utilizaram aditivo superplastificante no concreto apresentaram, no estado fresco, redução de 15% a 20% do valor de abatimento para a incorporação de 15% a 25% de borracha, comparando-se com o traço de referência (sem borracha). Os autores atribuem este fato ao comportamento hidrofóbico da borracha e ao efeito parede da superfície do material (MEYYAPPAN et al., 2023; HABIB; YILDIRIM; EREN, 2020);

- No estado endurecido dos concretos, os estudos de Akbari et al. (2022); Sidhu e Siddique (2022); Mohammed, Adamu e Shahir (2018); Habib, Yildirim e Eren (2020); e Wang, Wu e Cheng (2022) mostraram queda de 0,5% a 10% da massa específica do concreto quando há substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha na faixa de 0 a 30%;

- As propriedades mecânicas relatadas nos estudos de Akbari et al. (2022); Lin et al. (2023); Meyyappan et al. (2023); Sidhu e Siddique (2022) e Habib, Yildirim e Eren (2020) apresentaram uma queda tanto na resistência à compressão (1,6% a 64%) como na resistência à tração (5% a 50%), para o emprego de borracha na faixa de 0 a 30% da massa de agregado miúdo. Os pesquisadores associaram essa redução ao aumento da porosidade do material e as características físicas da borracha;

- Para o módulo de elasticidade os trabalhos apresentaram redução de 10% a 71% (Akbari et al., 2022; Lin et al., 2023; Sidhu; Siddique, 2022; Habib; Yildirim; Eren, 2020). No entanto, o fator de amortecimento apresentou tendência de aumento entre 5% e 91% para teores 0 a 25%; de borracha. Os pesquisadores associaram esse fato ao aumento da porosidade que auxilia na dissipação de energia na estrutura interna do compósito (HASSALANI; YOUSSEF, MILLS, 2017; LI et al., 2019; HABIB; YILDIRIM; EREN, 2020);

- Mohammed; Adamu e Shahir (2018); Wang; Wu e Cheng (2022) e Latelier et al. (2023) verificaram em seus estudos que, para teores de 0 a 30% de borracha, a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas diminui de 3% a 40%.

2.4 Compósitos de cimento com fibras de aço

As fibras de aço segundo a NBR 15530 (ABNT, 2019), são arames de aço trefilados a frio, produzidas por fusão, ou usinadas a partir de blocos de aço. São utilizadas em misturas de concretos e argamassas. Apresentam coeficiente de dilatação térmica igual ao do concreto, módulo de elasticidade cinco vezes maior que o do concreto, sendo que a deformação das fibras aço-carbono ocorrerem a uma temperatura acima de 370°C.

São classificadas conforme:

a) Com base na sua fabricação:

Grupo I: Arames trefilados a frio;

Fibra com ancoragens nas extremidades (Tipo A)

Fibra com ondulações no corpo (Tipo C)

Fibra reta sem ancoragens (Tipo R)

Grupo II: Chapas cortadas;

Fibra com ancoragens nas extremidades (Tipo A)

Fibra com ondulações no corpo (corrugada) (Tipo C)

Fibra reta sem ancoragens (Tipo R)

Grupo III: Arames trefilados a frio e escarificados (shaved);

Grupo IV: Fibras produzidas por fusão (melt extracted);

Grupo V: Usinadas a partir de blocos de aço.

b) Com base na sua forma (as fibras são retas ou deformadas);

c) Revestimento (quando fibras de aço recebem algum tipo de revestimento);

d) Com base na classificação do aço (teor de carbono)

- Baixo teor de carbono (no máximo 0,30% de carbono);
- Médio teor de carbono (de 0,30% a 0,60% de carbono);
- Alto teor de carbono (0,60% a 1,00% de carbono).

e) Com base nas tolerâncias de comprimento e diâmetro da fibra, conforme na Tabela 2 da NBR 15530 (ABNT, 2019).

Na produção de concretos com fibras de aço são obtidas as seguintes propriedades:

- Redução da fluidez no estado fresco (ATHIYAMAAN; GANESH, 2020);
- Aumento da capacidade de absorção de energia antes da ruptura, influenciando a tenacidade e o amortecimento do concreto (GHASEMI; GHASEMI; MOUSAVI, 2019; ALFERES FILHO et al., 2019; SRIDHAR; PRASAD, 2019).

O concreto com fibras de aço geralmente é empregado na construção de pisos industriais para todos os segmentos (áreas de produção, estocagem, docas etc.), pisos comerciais (shoppings, hipermercados, lojas etc.), radiers, pisos de aeroportos, pavimentos rodoviários, portuários e aeroportuários, pisos para câmaras frias, tubos de concreto e outros (FIGUEIREDO, 2011).

No Quadro 4 estão apresentados alguns trabalhos que tratam sobre as propriedades de concretos com fibras de aço realizados por diferentes pesquisadores.

Quadro 4: Resultados de trabalhos de concreto contendo fibras de aço.

Autores	Teor de Fibra de aço (%)	Relação a/c	Densidade (kg/m³)	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Fator de Amortecimento	Velocidade de Propagação de onda (m/s)
Yue; Wang e Beskos (2021) Concreto	0,5 1,0 1,5	0,40 (sem aditivo)	-	-	40,73 42,26 51,34	3,00 3,88 5,17	32,77 33,10 34,77	-	-
Narule e Ulape (2023) Concreto	0,00 0,25 0,50 0,75 1,00	0,45 (sem aditivo)	2534,83 2562,36 2598,56 2628,92 2649,78	72 68 65 59 54	32,54 35,28 37,32 38,64 39,32	3,18 3,42 3,74 4,03 4,29	-	-	-
Shelorkar e Jadhao (2022) Concreto	2,00 3,00 4,00	0,30 (sem aditivo)	2323,00 2380,00 2436,00	-	70,10 73,50 75,10	-	25,00 25,40 26,16	-	-
Alshahrani; Kulasegaram e Kundu (2023) Concreto	0 1 0,5	0,67	2311,00 2361,00 2403,00	690 730 770	71,90 73,70 69,20	-	37,02 38,55 41,62	-	-
Sridhar e Prasad (2019) Concreto	0,00 0,50 0,75 1,00 1,25	0,30	-	-	57,53 59,41 61,85 62,93 61,25	4,36 4,97 5,33 5,64 5,11	-	0,56 0,58 0,61 0,65 0,67	-
Arjomandi et al. (2023)	0,00 0,75	0,40 (com)	-	80 100	46,00 48,10	-	-	-	4530,00 4480,00

Concreto	1,25	0,50% de S.P.)		90	49,70				4830,00
Rabehi; Rabehi e Omrane (2023)	0	0,42 (com 2,45% de S.P.)	-	727	42,00	5,56	-	-	4365,00
Concreto	1,4			724	46,00	6,03			4420,00
Hedjazi e Castillo (2020)	0				36,50				5800,00
	0,10				38,72				5750,00
	0,25	0,32			41,50				5730,00
	0,50	(sem aditivo)	-	-	41,57	-	-	-	5650,00
	0,75				43,03				5570,00
Concreto	1,00				44,77				5550,00
	1,50				45,80				5420,00

Fonte: Autor (2023).

No Quadro 4 verifica-se para o concreto reforçados com fibra de aço que:

- A massa específica dos concretos aumenta de 1% a 5% para as misturas com teores crescentes de fibras de aço, de 0 a 4% do volume do concreto (NARULE; ULAPE, 2023; SHELORKAR; JADHAO, 2022; ALSHAHRANI; KULASEGARAM; KUNDU, 2023);

- As propriedades mecânicas apresentadas por Yue; Wang e Beskos (2021), Sridhar e Prasad (2019); Narule e Ulape (2023) apresentaram aumento de 3% a 27% para a resistência à compressão e de 7% a 70% para a resistência à tração. Os pesquisadores atribuem este fato à formação de uma malha de fibras, no interior do material, além da capacidade das fibras de resistir as fissuras iniciais e/ou interromper o caminhamento destas após a formação das mesmas.

- O módulo de elasticidade dos concretos, observado nos estudos de Yue; Wang e Beskos (2021); Shelorkar e Jadhao (2022); Alshahrani; Kulasegaram e Kundu (2023), teve uma pequena variação de 4% a 10% não apresentando grande influência nesta propriedade. Para o fator de amortecimento Sridhar e Prasad (2019) relataram aumento de 3% a 20% para a fração volumétrica de 0 a 1,25% de fibras incorporadas ao concreto.

- Quanto à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas Arjomandi et al. (2023); Rabehi; Rabehi e Omrane (2023) encontraram uma tendência de aumento de 2% a 7% na velocidade de propagação de ondas para traços com 0 a 1,40% de fibras incorporadas ao concreto. Por outro lado, Hedjazi e Castillo (2020) relataram uma tendência de redução de 1% a 7% para níveis crescentes de fibras no concreto, de 0 a 1,50%.

2.5 Incorporação do resíduo de borracha, vermiculita e fibras de aço ao concreto

O concreto normal é grandemente utilizado na construção civil devido a disponibilidade de seus materiais componentes e baixo custo final. Contudo algumas deficiências nas suas propriedades mecânicas são observadas, tais como: baixa resistência à tração, baixa capacidade de deformação, comportamento frágil e

facilidade quanto a propagação de fissuras (AFROUGHSALET; OZBAKKALOGLU, 2015; ZHANG; LIN; CHEN, 2021).

O reforço do concreto com fibras de aço melhora o desempenho do material, aumentando sua capacidade de absorver energia, tenacidade, ductilidade, resistência ao impacto e a abrasão (YUE; WANG; BESKOS, 2021). As fibras criam barreiras para o caminhamento das fissuras ao longo do material (NEMATZADEH; HOSSEINI; OZBAKKALOGLU, 2021).

Assim nesta pesquisa optou-se pelo emprego de fibras de aço de fator de forma 65/35. A incorporação da borracha e vermiculita ao concreto se dá pelos ganhos nas propriedades acústicas que ambos os materiais oferecem. E, por fim espera-se o efeito global da melhora das propriedades do concreto, relacionadas as propriedades acústicas e amortecimento. Na Figura 15 está apresentada a lacuna encontrada na literatura que está sendo estudada nesta pesquisa.

Figura 15: Lacuna na literatura que está sendo estudada nesta pesquisa.



3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo apresentado tem por objetivo o desenvolvimento de traços de concreto reforçados com fibras de aço, em que o agregado miúdo é parcialmente substituído pela vermiculita expandida e resíduos de borracha.

Foram selecionados quatro traços de concreto: (C-0B-0V) o traço de referência, (C-10B-30V) com 30% de vermiculita e 10% de resíduos de borracha em substituição ao agregado miúdo natural, (C-20B-30V) 30% de vermiculita e 20% de resíduos de borracha e (C-30B-30V) 30% de vermiculita e 30% de resíduos de borracha. Os materiais utilizados para produção dos corpos de prova foram os seguintes: água, cimento portland CPV-ARI, sílica ativa, agregado miúdo, agregado graúdo, aditivo superplastificante, vermiculita, resíduos de borracha e fibras de aço.

Os concretos foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos. A caracterização física dos materiais, mistura dos concretos, moldagens de corpos de prova, ensaios nos estados fresco e endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia, localizada no campus I da UNICAMP, em Limeira – São Paulo.

Os procedimentos dos ensaios realizados seguiram as normas da Associação de Normas Técnicas Brasileiras – ABNT.

3.1 Materiais componentes do concreto

3.1.1 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada, foi a água potável fornecida pela rede de tratamento e distribuição de água do município de Limeira - SP.

3.1.2 Cimento Portland

Para o estudo realizado foi empregado na produção dos concretos o Cimento Portland CPV – ARI.

3.1.3 Sílica Ativa

A sílica ativa foi empregada na mistura do concreto como uma adição mineral e suas características encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5: Características físicas e químicas da sílica ativa.

Características	
Teor de SiO₂	>90%
Superfície Específica	19.000m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Massa Específica	2,20 kg/dm ³

Fonte: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>

3.1.4 Aditivo redutor de água

O aditivo utilizado é do tipo redutor de água tipo 2 (RA2), segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), também conhecido como superplastificante de pega normal.

Este aditivo oferece vantagens tais como: grande redução no fator água cimento, dosagens econômicas, boa estabilização quando aplicado em altas consistências, ótima dispersão do produto na betonada e não provoca retardo no tempo de pega. As características físicas do aditivo estão no Quadro 6.

Quadro 6: Características físicas do aditivo empregado nesta pesquisa.

Características	
Dosagem recomendada (Sobre o peso do cimento)	$\geq 0,2\% \leq 5,0\%$
Densidade	1,12 kg/L
Estado	líquido
Cor	marrom

Fontes: Relatório MC-Bauchemie.

3.1.5 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo utilizado foi areia, do tipo quartzoso, proveniente da região de Limeira - SP.

O material foi separado e passado por uma peneira de malha 9,5 mm, para que fosse retirada quaisquer impurezas presentes no material. Após este processo o material foi disposto em bandejas e colocado em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas, para secagem.

3.1.6 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi do tipo basáltico, proveniente também da região de Limeira - SP.

O material foi separado e foram retidas manualmente as folhas e demais impurezas presentes no material. Após este processo o material foi disposto em bandejas e colocado em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas, para secagem.

3.1.7 Fibras de aço

A fibra empregada no concreto, foi a fibra de aço de fator de forma 65/35. A mesma é comercializada em sacos de 20kg. São disponibilizadas coladas em pentes como representadas na Figura 16, o que possibilita uma mistura mais rápida e uma distribuição mais homogênea dentro da matriz cimentícia, sem a formação de “bolas” ou “ouriços” dentro da mistura.

Figura 16: Fibras de aço empregadas na pesquisa.



Fonte: Autor (2023).

3.1.8 Vermiculita expandida

A vermiculita expandida utilizada, é do tipo grossa, com massa específica de 0,45 g/cm³. A mesma é comercializada em sacos de 100 litros e está apresentada na Figura 17.

Figura 17: Vermiculita expandida.



Fonte: Autor (2023).

3.1.9 Borracha de pneus

A borracha empregada na pesquisa (Figura 18) é um resíduo oriundo de pneus de rolagem e obtido pelo processo de recauchutagem de pneus de carga de ônibus e caminhões. O mesmo foi coletado em uma empresa localizada na região da cidade de Limeira - SP.

Figura 18: Borracha proveniente da recauchutagem de pneus, peneirada e passante na peneira de malha #1,2mm e retida na peneira #0,6mm.

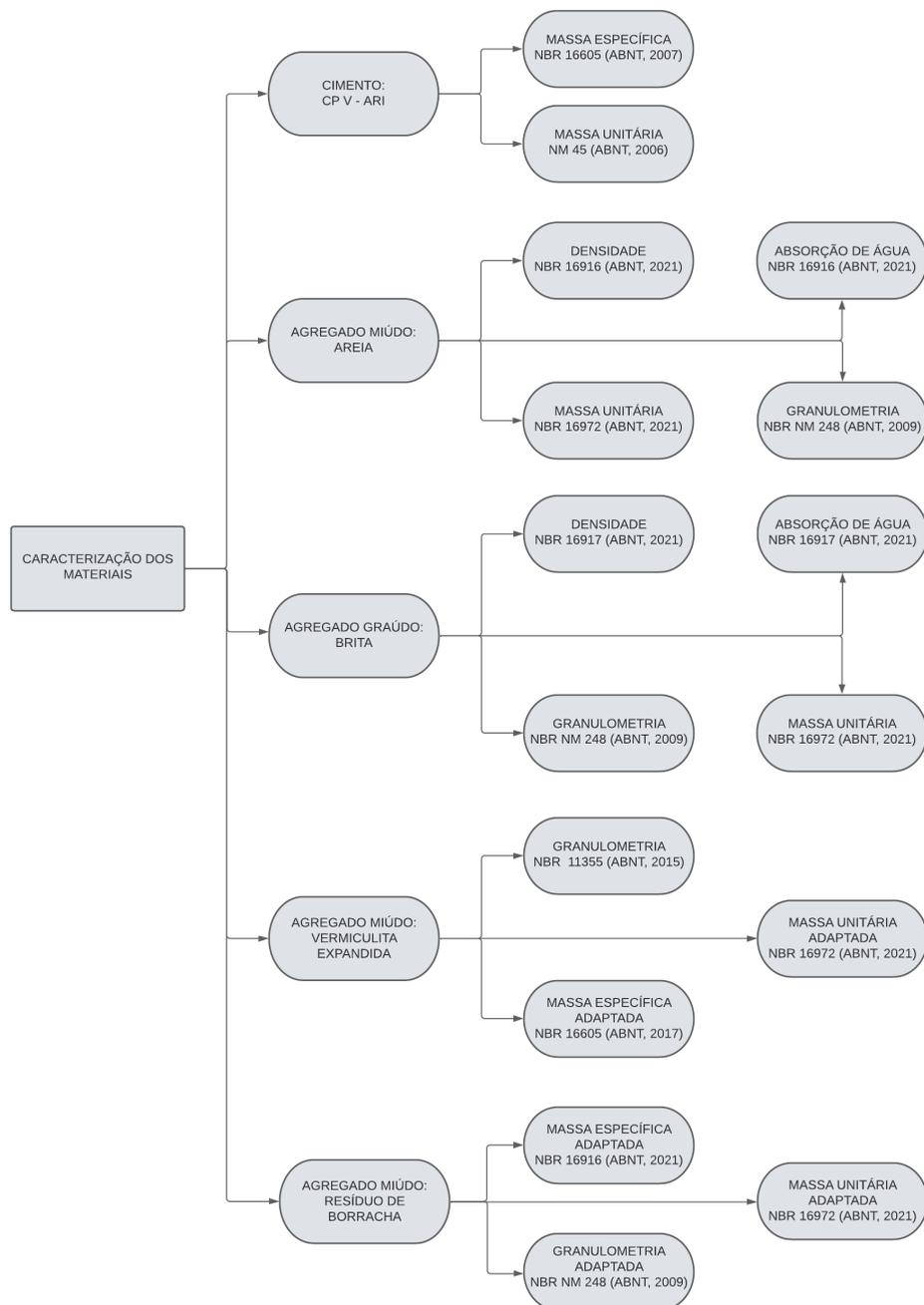


Fonte: Autor (2023).

3.1 Caracterização física dos materiais

Os procedimentos de execução dos ensaios de caracterização física dos materiais componentes dos concretos, basearam-se nos métodos de ensaios e procedimentos conforme normas da ABNT e estão apresentadas no fluxograma conforme Figura 19.

Figura 19: Ensaio de caracterização física dos materiais componentes dos concretos.



Fonte: Autor (2023).

3.2 Produção dos concretos

O desenvolvimento do traço de referência (C-0B-0V) 1:0,10:2,48:2,50:0,50 (em massa), seguiu o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) sendo utilizado 40 kg/m³ de fibras de aço.

Na Tabela 1 está apresentada a quantidade dos materiais para a produção de 1 m³ de concreto.

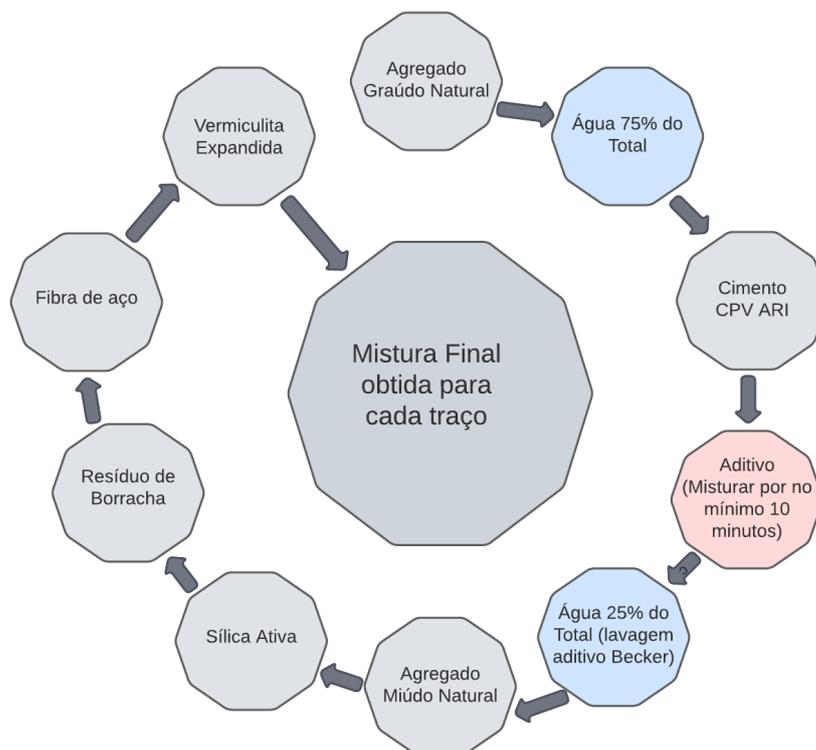
Tabela 1: Composição dos materiais componentes em massa (kg/m³) para a produção dos concretos utilizados na pesquisa.

TRAÇO	Cimento (kg)	Sílica Ativa (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Vermiculita (kg)	Borracha (kg)
C-0B-0V	375	37,5	187,50	2,250	930	937,5	0,00	0,00
C-10B-30V	375	37,5	187,50	4,688	558	937,5	47,20	39,86
C-20B-30V	375	37,5	187,50	5,250	465	937,5	47,20	79,71
C-30B-30V	375	37,5	187,50	6,375	372	937,5	47,20	119,57

Fonte: Autor (2023).

Os concretos foram misturados em betoneira de eixo inclinado, no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. A Figura 20 apresenta a ordem de entrada dos materiais durante o processo de mistura dos traços. Na sequência foram realizados os ensaios de consistência conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020) e gravimétrico conforme a NBR 9833 (ABNT, 2009).

Figura 20: Fluxograma sobre a ordem de entrada dos materiais na betoneira.



Fonte: Autor (2023).

A moldagem dos corpos de prova de concretos seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os moldes cilíndricos metálicos, de dimensão 100 x 200 mm, receberam previamente uma camada de desmoldante. As formas foram preenchidas da seguinte maneira: com auxílio de uma concha o concreto foi colocado em duas camadas na forma e cada camada foi adensada com haste metálica, por meio de doze golpes distribuídos uniformemente em toda seção transversal do molde; após a finalização do adensamento, com auxílio de uma colher de pedreiro, foi realizado o rasamento da superfície do concreto.

Após a desmoldagem dos corpos de prova, os mesmos foram imersos em água (Temperatura $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$), dentro da câmara úmida, onde permaneceram até as idades dos ensaios realizados aos 7 e 28 dias de cura, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). A Tabela 2 mostra as quantidades de corpos de prova para cada ensaio desta pesquisa.

Tabela 2: Quantidades de corpos de prova para cada ensaio, aos 7 e 28 dias.

Traços	C-0B-0V	C-10B-30V	C-20B-30V	C-30B-30V
Absorção de água, massa específica e índice de vazios* NBR 9778 (ABNT, 2009)	3	3	3	3
Resistência à compressão NBR 5739 (ABNT, 2018)	6	6	6	6
Resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)	3	3	3	3
Módulo elasticidade estático NBR 8522-1 (ABNT, 2021)	3	3	3	3
Módulo elasticidade dinâmico e amortecimento NBR 8522-2 (ABNT, 2021) e ASTM C215-19	6	6	6	6
Caracterização acústica* NBR 15630 (ABNT, 2009) e NBR 8802 (ABNT, 2019)	6	6	6	6

*Ensaio realizado somente aos 28 dias.

3.3 Ensaios no estado fresco dos concretos

3.3.1 Determinação do Índice de Consistência

Para a determinação do índice de consistência do concreto no estado fresco, foi seguida a NBR 16889 (ABNT, 2020). A Figura 21 apresenta o ensaio de abatimento realizado para o traço referência (C-0B-0V).

Figura 21: Ensaio de abatimento do tronco de cone para os traços ensaiados.



Fonte: Autor (2023).

3.3.2 Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico

Para a determinação da massa específica, rendimento e teor de ar utilizou-se a NBR 9833 (ABNT, 2009). O recipiente de moldagem foi preenchido em três camadas, aplicando-se 25 golpes de mesma intensidade em cada camada, de forma espiral sobre a superfície do corpo de prova, e após enchimento total do molde, foram dados golpes com martelo de borracha de forma suave na lateral do recipiente de molde, nas alturas referentes a cada camada adensada, até que não se observasse marcas na superfície do concreto deixados pela haste de adensamento.

Assim que a etapa de adensamento foi concluída foi realizado o rasamento, fazendo movimentos vai e vem sobre a superfície do concreto para dar acabamento sem bolhas de ar e colocada a placa de vidro na sua superfície.

Na sequência aferiu-se a massa de todo o conjunto como apresentado na Figura 22.

Figura 22: Realização de ensaio para determinação de massa específica, do rendimento e teor de ar pelo método gravimétrico para os traços ensaiados.



Fonte: Autor (2023).

3.4. Ensaios no estado endurecido do concreto

3.4.1 Determinação da Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Para a obtenção do índice de vazios, massa específica e absorção de água do concreto endurecido, foi seguida a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), aos 7 e 28 dias de cura. As amostras foram retiradas da água e secas em estufa a temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, por um período de 72 horas, sendo registradas suas massas secas.

Após pesagem das amostras secas, as mesmas foram imersas em água a temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para que ocorresse a saturação da mesma, por um período de 72 horas. No final do tempo decorrido, as amostras imersas em água foram pesadas com auxílio de balança hidrostática, para a obtenção das massas imersas. Na sequência a superfície dos corpos de prova foi seca e realizada a pesagem das amostras em balança convencional e obtida as massas saturadas.

3.4.2 Resistência à Compressão

Para obter a resistência à compressão segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizou-se o número de corpos de prova apresentados na Tabela 2. Os mesmos foram retificados e ensaiados a velocidade constante de carregamento de $0,45 \pm 0,15 \text{ MPa/s}$, em prensa universal de ensaios da marca Instron/EMIC, modelo EMIC 23-600, com capacidade de carga 600kN, instalada na Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. Na Figura 23 está o ensaio de resistência à compressão do traço de referência.

Figura 23: Execução de ensaio de resistência à compressão para os traços ensaiados.



Fonte: Autor (2023).

3.4.3 Resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral (Figura 24), também foi realizado em prensa universal de ensaios da marca Instron/EMIC, modelo EMIC 23-600, com capacidade de carga 600kN, conforme procedimentos indicados na NBR 7222 (ABNT, 2011), aplicando-se carga a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s.

Figura 24: Execução de ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os traços ensaiados.



Fonte: Autor (2023).

3.4.4 Módulo de elasticidade estático

O ensaio de módulo estático foi realizado seguindo a NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Os corpos de prova foram retificados e ensaiados em prensa universal de ensaios da marca Instron/EMIC, modelo EMIC 23-600, com capacidade de carga 600kN, instalada na Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, conforme Figura 25. Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos (100x200mm) para cada idade, aos 7 e a 28 dias de cura.

Figura 25: Execução de ensaio de módulo estático para os traços ensaiados.



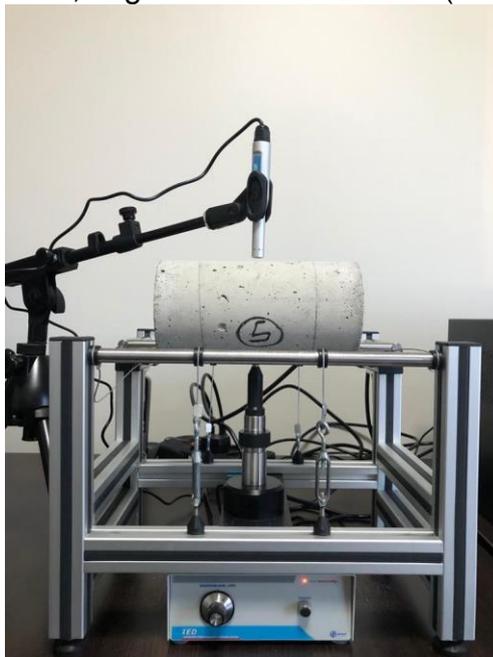
Fonte: Autor (2023).

3.4.5 Módulo de elasticidade dinâmico e fator de amortecimento

Para a medida do módulo de elasticidade dinâmico e o fator de amortecimento foi utilizado o equipamento Sonelastic® para a realização dos ensaios não destrutivos, conforme NBR8522-2 (ABNT, 2021) e ASTM C215-19. A configuração de ensaio apresentada na Figura 26 foi utilizada para obtenção dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico e fator de amortecimento.

Para a realização deste ensaio foram utilizados 6 corpos de prova cilíndricos (100x200mm) para cada traço, aos 7 e 28 dias. A balança utilizada para a pesagem dos corpos de prova cilíndricos foi a Balança Marte de modelo AS 5500C.

Figura 26: Execução de ensaio de módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento, seguindo a NBR 8522-2 (ANBT, 2021).



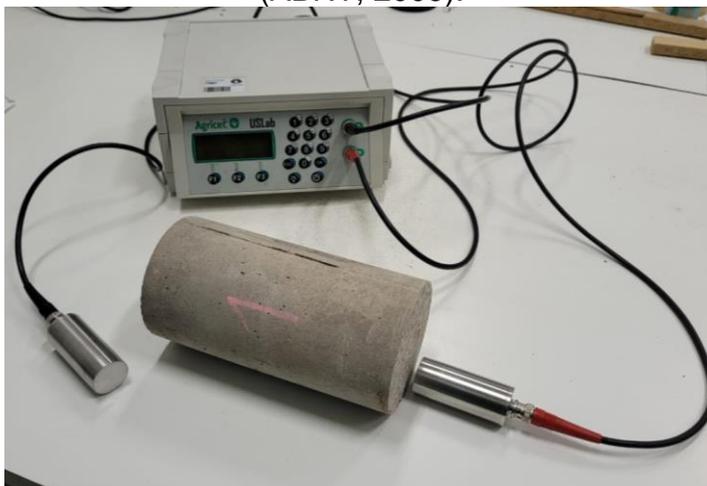
Fonte: Autor (2023).

3.4.6 Caracterização acústica

A caracterização acústica foi realizada por meio da determinação da velocidade de propagação de onda utilizando-se o equipamento US Lab Agricef seguindo a NBR 15630 (ABNT, 2009) e a NBR 8802 (ABNT, 2019) (Figura 27).

Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos (100x200mm) para cada idade, aos 7 e a 28 dias de cura.

Figura 27: Execução de ensaio de caracterização acústica, seguindo a NBR 15630 (ABNT, 2009).



Fonte: Autor (2023).

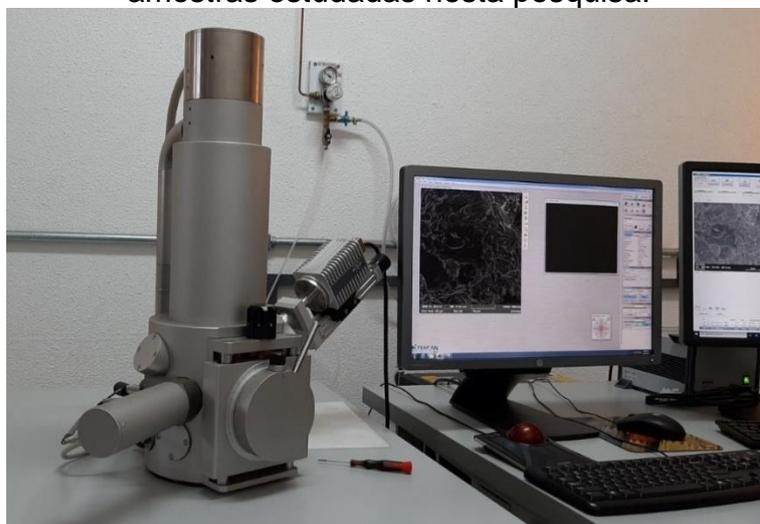
3.4.7 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

As amostras para todos os traços do ensaio de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas através dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão a 28 dias, que foram reduzidas com o auxílio de um martelo até que seu tamanho fosse adequado ao *stub* de entrada para ensaio. O ensaio foi realizado no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica (LAMME) da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, no microscópio modelo VEGA3 da fabricante TESCAN. O equipamento foi configurado com um feixe de energia de 10 kV, uma corrente 500pA e a uma distância de trabalho de 10 mm.

Acoplado ao microscópio foi utilizado o leitor de espectrometria por energia dispersiva (EDS) da marca Bucker Nano, modelo X flash detector 630M, para obter os componentes químicos de alguns pontos da pasta cimentícia e de agregados.

Para melhor visualização das propriedades, duas amostras de cada traço foram utilizadas, para garantir a melhor compreensão da microestrutura do material. Por se tratar de amostras não metálicas, estas precisaram ser submetidas a processo de metalização para melhorar a condutividade eletrônica das mesmas e assim ser possível produzir imagens mais precisas. A Figura 28 mostra o equipamento em que o ensaio foi realizado.

Figura 28: Equipamento utilizado na realização do ensaio de microscopia das amostras estudadas nesta pesquisa.



Fonte: Autor (2023).

3.4.8 Análise estatística

Para analisar os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, velocidade de propagação de onda e fator de amortecimento, aos 28 dias, foi utilizada a análise de variância (One Way ANOVA), seguindo o teste de comparações múltiplas Tukey utilizando o software estatístico Action Stat.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física dos materiais

4.1.1 Cimento Portland - CPV-ARI

Os resultados de caracterização física do cimento utilizado, estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características físicas cimento CPV-ARI.

Propriedades	Unidade	Resultado
Massa Específica NBR 16605 (ABNT, 2017)	Kg/dm ³	3,10
Massa Unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006)	Kg/dm ³	1,03
Tempo de Pega: Início/Fim	(min)	130/210

Fonte: Autor (2023).

4.1.2 Agregado Miúdo Natural

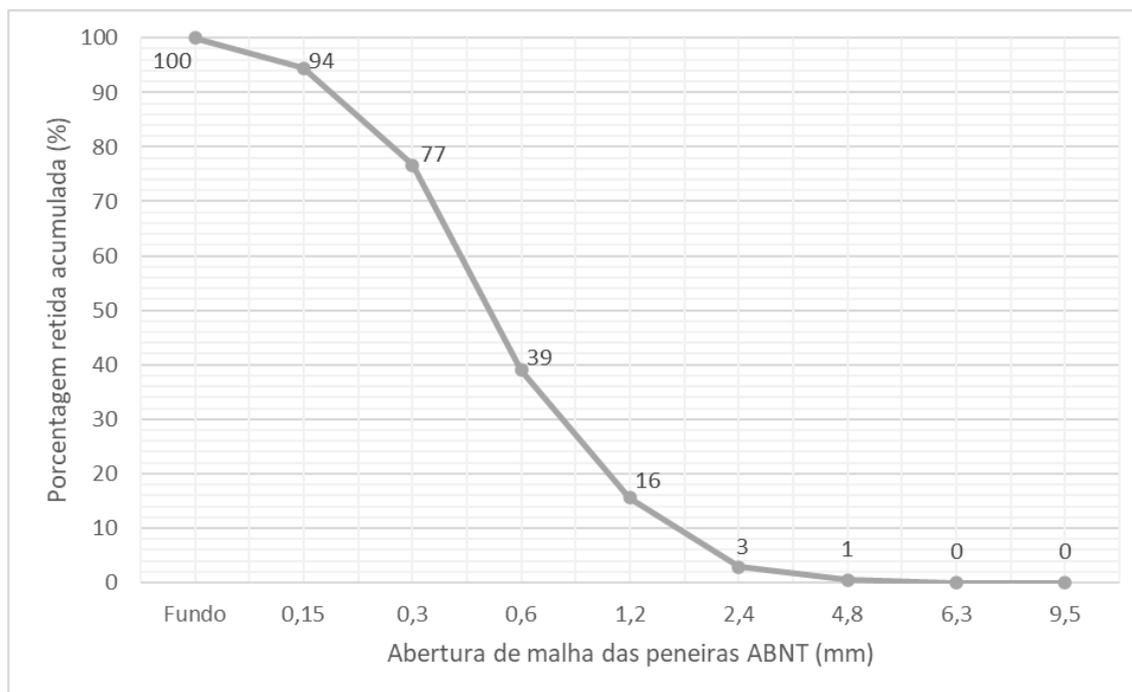
Os resultados de caracterização física do agregado miúdo, estão expressos na Tabela 4 e na Figura 29.

Tabela 4: Características físicas do agregado miúdo.

Ensaio Realizado	Unidade	Resultado	NBR
Densidade	g/cm ³	2,66	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa Unitária	g/cm ³	1,50	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Diâmetro Máximo Característico	mm	2,40	NBR NM 248 (ABNT, 2009)
Módulo de Finura	-	2,30	NBR NM 248 (ABNT, 2009)

Fonte: Autor (2023).

Figura 29: Curva granulométrica do agregado miúdo natural, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2009)



Fonte: Autor (2023).

4.1.3 Agregado Graúdo

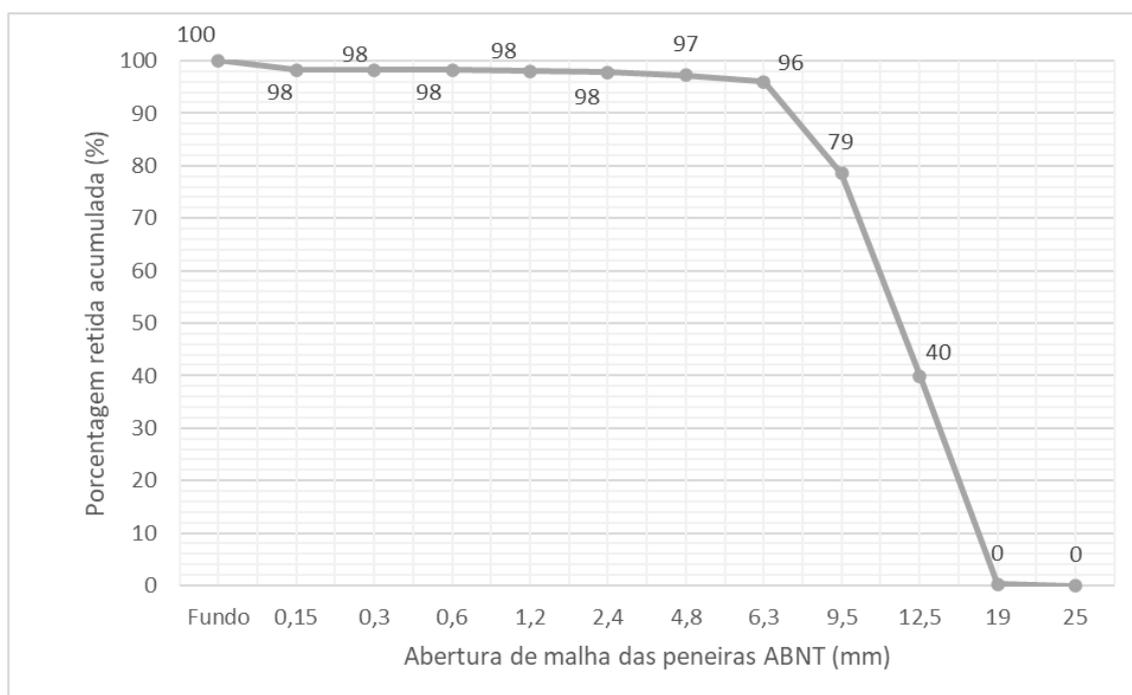
Os resultados de caracterização física do agregado graúdo, estão expressos na Tabela 5 e na Figura 30.

Tabela 5: Características físicas do agregado graúdo.

Ensaio Realizados	Unidade	Resultado	NBR
Densidade	g/cm ³	2,80	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa Unitária	g/cm ³	1,49	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Diâmetro Máximo Característico	mm	19,00	NBR NM 248 (ABNT, 2009)
Módulo de Finura	-	6,66	NBR NM 248 (ABNT, 2009)

Fonte: Autor (2023).

Figura 30: Curva granulométrica do agregado gráudo natural, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2009)



Fonte: Autor (2023).

4.1.4 Vermiculita expandida

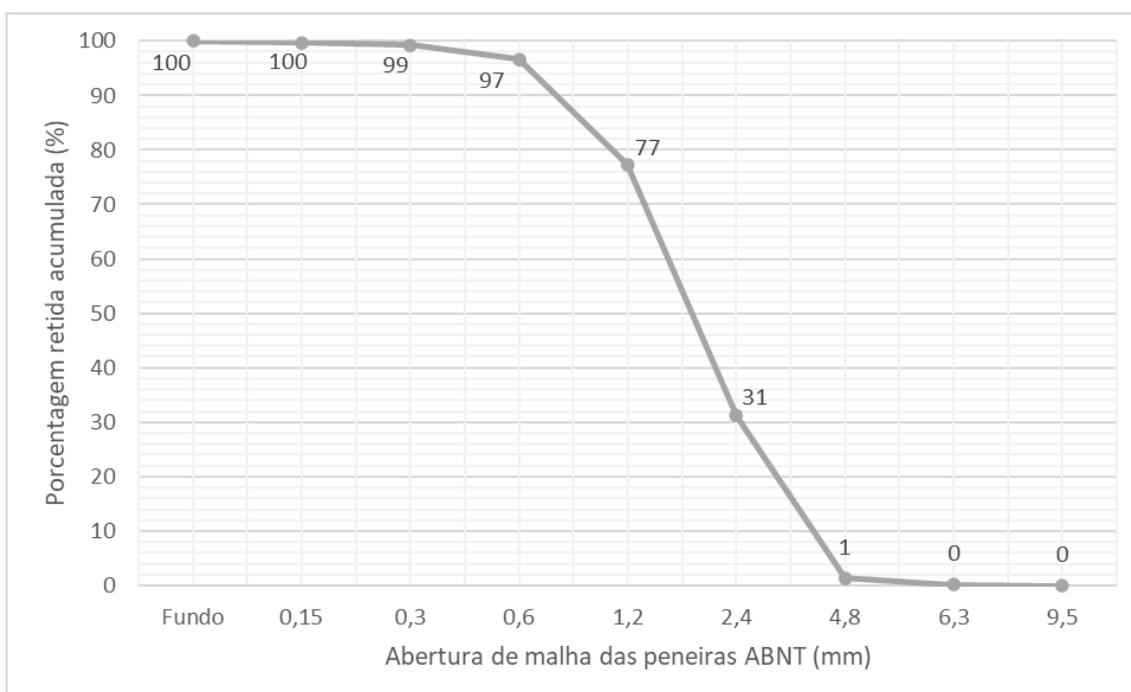
Os resultados de caracterização física da vermiculita expandida, estão apresentadas na Tabela 6 e na Figura 31, e os resultados de análise química são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6: Características físicas da vermiculita expandida.

Ensaio Realizados	Unidade	Resultado	NBR
Massa Específica	g/cm ³	0,45	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa Unitária	g/cm ³	0,12	adaptado a partir NBR 16972 (ABNT, 2021)
Diâmetro Máximo Característico	mm	4,80	NBR 11355 (ABNT, 2015)
Módulo de Finura	-	4,05	NBR 11355 (ABNT, 2015)

Fonte: Autor (2023).

Figura 31: Curva granulométrica da vermiculita expandida, seguindo a NBR 11355 (ABNT, 2015)



Fonte: Autor (2023).

Tabela 7: Análise química da vermiculita, obtida por meio de espectrometria de energia dispersiva (EDS).

Elemento	(%)
C	3,59
O	48,54
Na	0,19
Mg	12,59
Al	6,66
Si	12,96
K	8,55
Ti	1,17
Fe	5,75

Fonte: Autor (2023).

4.1.5 Resíduo de borracha

Os resultados de caracterização física do resíduo de borracha, se encontram na Tabela 8 e Figura 32. A análise química da borracha está apresentada na Tabela 9.

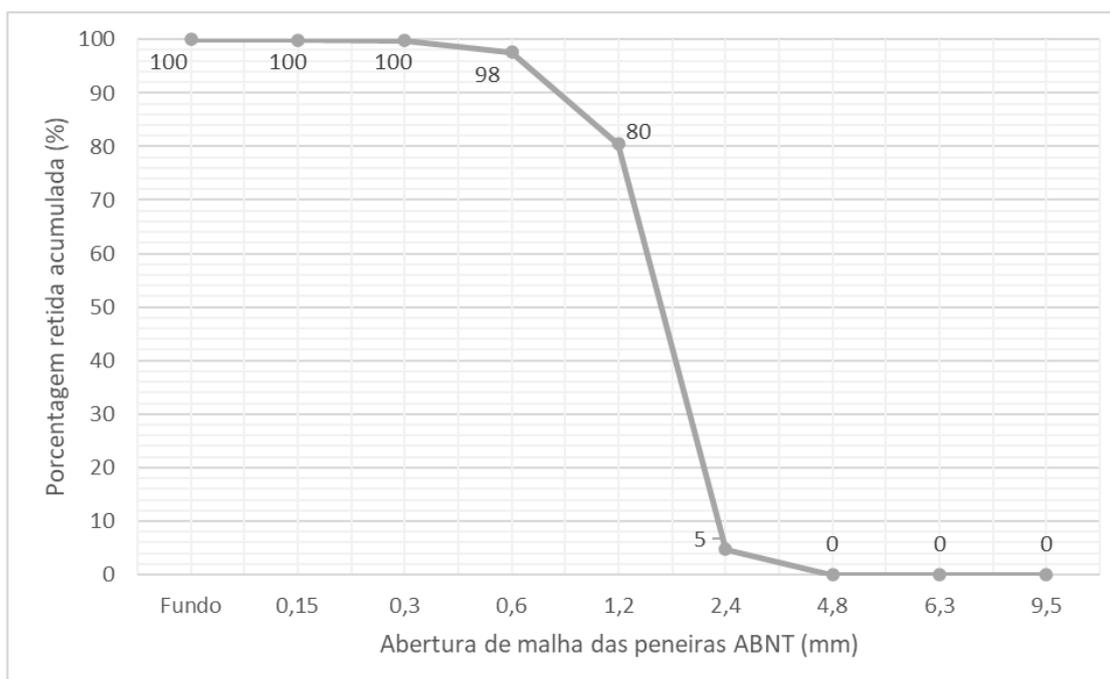
Nesta pesquisa foi empregado o material passante na peneira de malha #1,2 mm e retido na peneira de malha #0,6 mm.

Tabela 8: Características físicas do resíduo de borracha.

Ensaio	Unidade	Resultado	NBR
Realizados			
Massa Específica	kg/dm ³	1,14	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa Unitária	kg/dm ³	0,35	adaptado a partir NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Autor (2023).

Figura 32: Curva granulométrica do resíduo de borracha, seguindo adaptação da NBR NM 248 (ABNT, 2009)



Fonte: Autor (2023).

Tabela 9: Análise química do resíduo de borracha, obtida por meio de espectrometria de energia dispersiva (EDS).

Elemento	(%)
C	91,50
Zn	3,50
O	3,30
S	1,20
Na	0,30
Ca	0,20

Fonte: Autor (2023).

4.2 Propriedades dos concretos no estado fresco

4.2.1 Determinação do Índice de Consistência

Este ensaio foi realizado seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020) imediatamente após a mistura do concreto na betoneira. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 10: Valores de abatimento do concreto, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020).

Traços	Período	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Abatimento (mm)
C-0B-0V	TARDE	25,3	78,0	100,00
C-10B-30V	TARDE	27,0	42,0	130,00
C-20B-30V	TARDE	26,0	55,0	145,00
C-30B-30V	TARDE	24,0	51,0	150,00

Fonte: Autor (2023).

Para que fosse mantido o abatimento no intervalo 125 ± 25 mm, manteve-se fixo o fator água/cimento em 0,50 e variou-se o teor de aditivo em função do teor de borracha adicionada a mistura.

4.2.2 Determinação da massa específica, consumo de cimento e teor de ar de acordo com o método gravimétrico.

Os resultados obtidos neste ensaio estão expressos na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio para determinação da massa específica, consumo de cimento e teor de ar, conforme NBR 9833 (ABNT, 2009).

Traços	Massa específica do concreto (Kg/m ³)	Rendimento do concreto (m ³)	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Volume total dos componentes da betonada (m ³)	Teor de ar (%)
C-0B-0V	2.445,64	0,080	371,68	0,082	2,06
C-10B-30V	2.326,15	0,075	399,54	0,082	9,71
C-20B-30V	2.289,91	0,074	403,00	0,082	10,66
C-30B-30V	2.240,94	0,074	404,33	0,082	11,03

Fonte: Autor (2023).

Segundo os resultados apresentados na Tabela 11, os traços C-10B-30V, C-20B-30V e C-30B-30V tiveram redução da massa específica em teores de 4,89%, 6,37% e 8,37% respectivamente em relação ao concreto de referência C-0B-0V. Isso está associado ao fato das massas específicas da borracha e vermiculita expandida serem inferiores à da areia.

Também é possível notar que com o crescimento do teor de borracha nos diferentes traços, os resultados apresentam um visível aumento do teor de ar incorporado aos concretos, isso se dá devido à natureza hidrofóbica da borracha.

Esta tendência de comportamento também foi observada por Thomas; Gupta (2015); Assaggaf et al. (2021) e Nematzadeh, Hosseini e Ozbakkaloglu (2021) em suas pesquisas.

4.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

4.3.1 Determinação da Absorção de água, índice de vazios, e massa específica

Os resultados referentes a absorção de água, índice de vazios e massa específica, no estado endurecido do concreto, estão apresentados na Tabela 12.

Todos os traços estudados nesta pesquisa foram classificados segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) como concreto normal (C) cuja massa específica seca esta compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Tabela 12: Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica, realizados aos 28 dias.

	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica Real (kg/l)
C-0B-0V	4,14	9,89	2,65
C-10B-30V	3,70	8,24	2,43
C-20B-30V	3,43	7,66	2,42
C-30B-30V	5,38	10,83	2,26

Fonte: Autor (2023).

Observa-se na Tabela 12 que a absorção de água e índice de vazios dos traços C-10B-30V e C-20B-30V diminuiu, em relação ao C-0B-0V, e aumentou para C-30B-30V.

Yilmaz e Degirmenci (2009) também relataram maior absorção de água ao utilizar partículas de dimensão entre 0,0-0,25 mm de resíduos de borracha em compósitos de cimento contendo cinzas volantes.

Segre et. al. (2004) também notou redução da absorção de água para composições com 10% de resíduos de borracha em comparação ao traço de referência.

Ganjian; Khorami; Maghsoudi (2009) também relataram redução da absorção de água ao incorporar 5%, 7,5% e 10% de borracha em substituição parcial ao cimento dentro do concreto.

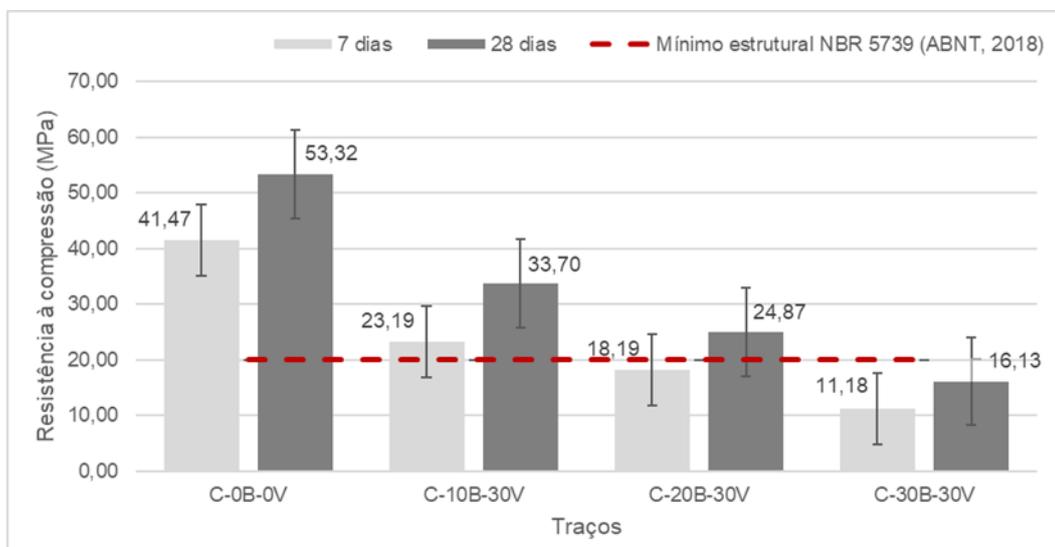
Entretanto outros pesquisadores relataram o inverso, ou seja, a absorção de água do concreto aumentou com teores crescentes de borracha na mistura (GUPTA et. al., 2014; SILVA et al., 2019).

A vermiculita também contribuiu para o aumento da absorção de água e redução da massa unitária dos concretos. Resultados similares a estes foram relatados por outros pesquisadores (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015; MO et al., 2018).

4.3.2 Resistência à compressão

Os resultados referentes à compressão estão apresentados na Figura 33.

Figura 33: Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o concreto para fins estruturais aquele que possui resistência à compressão mínima de 20 MPa, devendo pertencer ao Grupo I (C20 a C50) ou Grupo II (C55 a C100). Os traços C-0B-0V, C-10B-30V e C-20B-30V são classificados como estruturais segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015).

Verifica-se que, ao aumentar o teor de borracha nos concretos ocorre diminuição da resistência à compressão em relação ao traço C-0B-0V de: 36,8% para C-10B-30V, 53,4% para C-20B-30V, 69,7% para C-30B-30V respectivamente.

Esta tendência foi constatada por outros pesquisadores (SILVA et al., 2019; ANGELIN et al., 2020; LINTZ et al., 2021; LI et al., 2019).

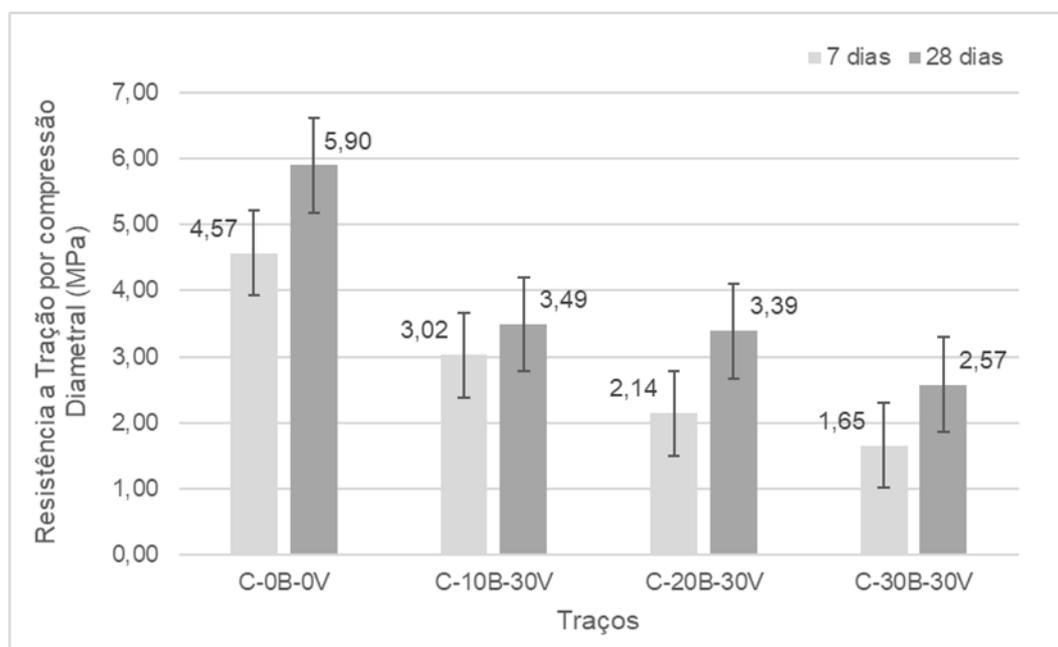
He et al. (2021), verificaram que tratando a superfície da borracha com soluções de NaOH, modificando-a com sulfatos ou tratando com ureia, observaram uma diminuição considerável da perda de resistência ao incorporar teores de borracha maiores que 20%.

Nos estudos de Mo et al. (2018) verificou-se a redução de 52% da resistência à compressão de compósitos cimentícios contendo 30% de vermiculita, em substituição parcial à areia.

4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados referentes à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 34.

Figura 34: Resultados de resistência à tração por compressão diametral a 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Assim como aconteceu com a resistência à compressão, pode-se verificar diminuição nos resultados de resistência à tração de: 40,8% para C-10B-30V, 42,5% para C-20B-30V, 56,4% para C-30B-30V respectivamente.

O mesmo comportamento foi observado por Guo et al. (2019) que reportaram diminuição de cerca de 30% da resistência à tração em concretos com 20% de borracha e por Chai et al. (2019) que observaram diminuição da resistência à tração de 17,9% em concretos com 20% de borracha.

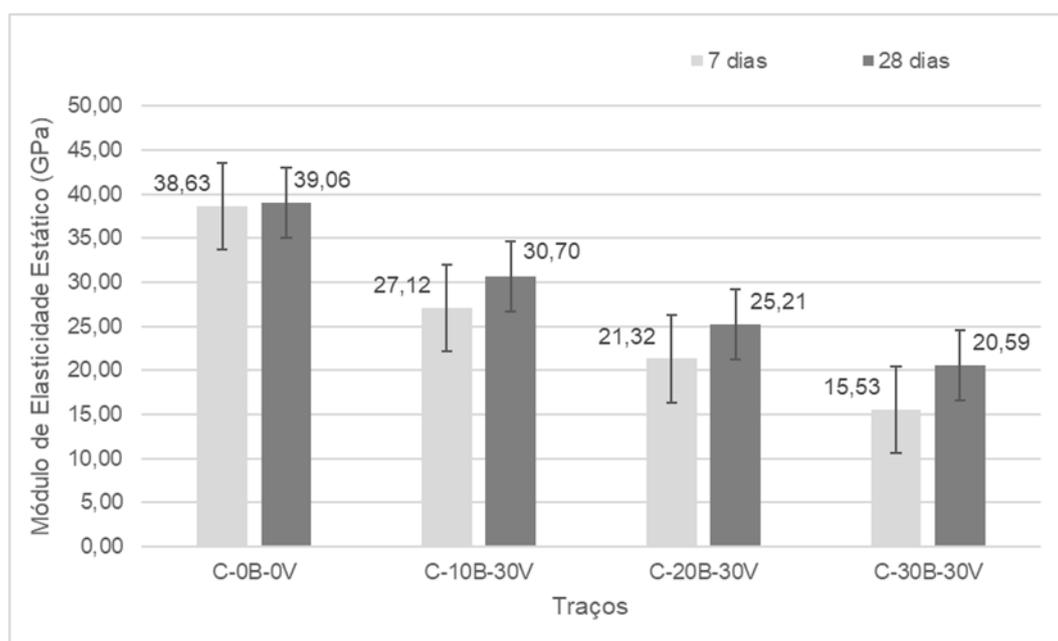
Segundo Akbari et al. (2022); Lin et al. (2023); Meyyappan et al. (2023); Sidhu e Siddique (2022) e Habib, Yildirim e Eren (2020) para concreto com teores 0 a 30% de borracha em relação a massa de agregado miúdo, observou-se diminuição da resistência à tração na faixa de 5% a 50%.

Sridhar e Prasad (2019), relataram para o concreto contendo 0,50% de fibras de aço em relação ao seu volume, ganho de 14% na resistência à tração quando comparada ao traço sem fibras.

4.3.4 Módulo de elasticidade estático

Os resultados referentes ao módulo de elasticidade estático estão apresentados na Figura 35.

Figura 35: Resultados de módulo de elasticidade estático, aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

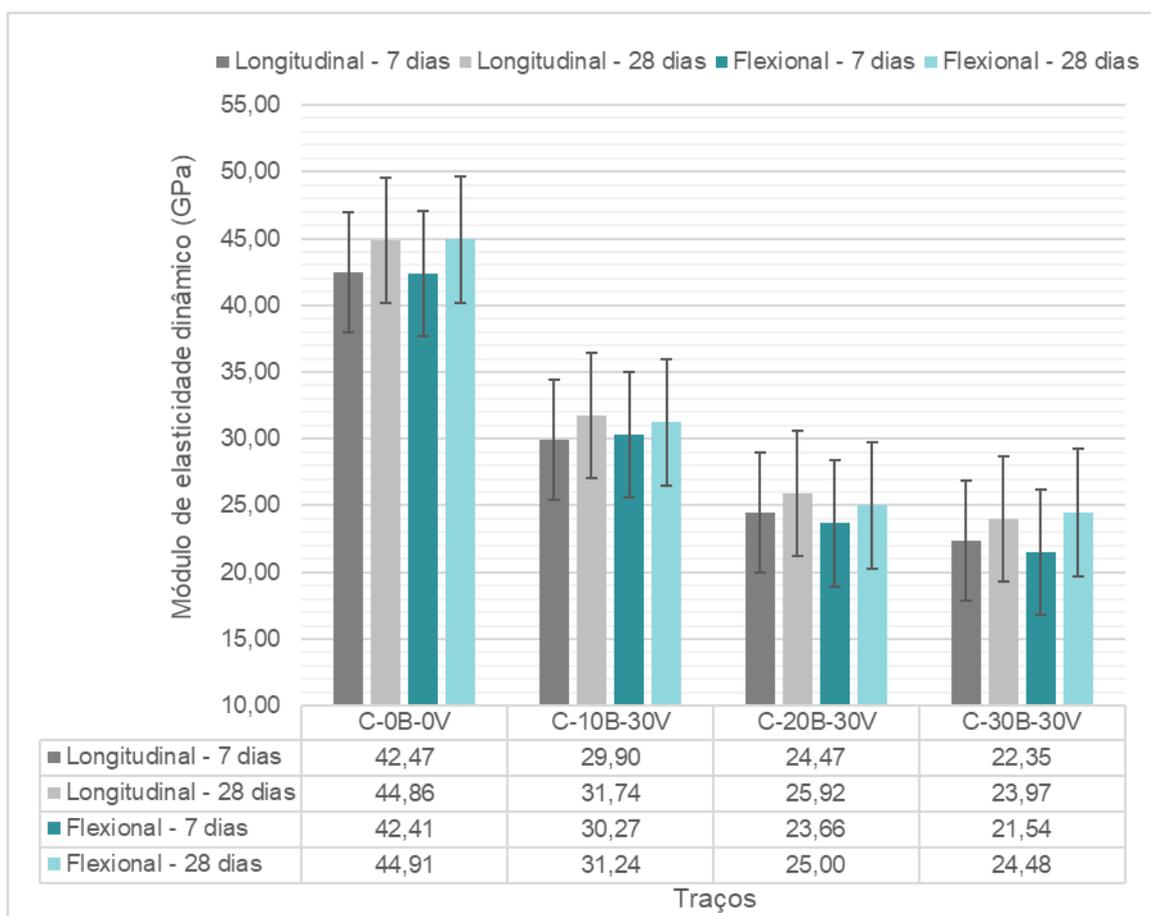
Verifica-se para os resultados obtidos que também houve menor diminuição desta propriedade para teores crescentes de borracha, sendo: 23,1% para C-10B-30V, 35,6% para C-20B-30V, 47,3% para C-30B-30V respectivamente.

Isso também foi observado nos estudos de Akbari et al. (2022) e Cao et al. (2021) que relatam uma diminuição para o módulo de elasticidade estático de cerca 34% para concretos contendo 20% de resíduos de borracha.

4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico e fator de amortecimento

Os resultados referentes ao módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento estão apresentados nas Figuras 36, 37 e 38 respectivamente.

Figura 36: Resultados de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e flexional aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Pode-se observar que, para os resultados encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico houve uma tendência de queda para teores crescentes de borracha, 29-30% para o traço C-10B-30V, 42-44% para C-20B-30V, e 46-45% para C-30B-30V respectivamente.

Tendência similar a esta foi observada no estudo de Wu et al. (2020) que notou uma queda de 38% no módulo de elasticidade dinâmico para um índice de 15% de substituição de agregado miúdo natural pela borracha. Este fato também foi

observado no estudo de Huang et al. (2020) que substituiu o agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% havendo redução do módulo de elasticidade em 15,71%, 29,28%, 32,14% e 33,57%, respectivamente.

Figura 37: Resultados de fator de amortecimento longitudinal aos 7 e 28 dias.

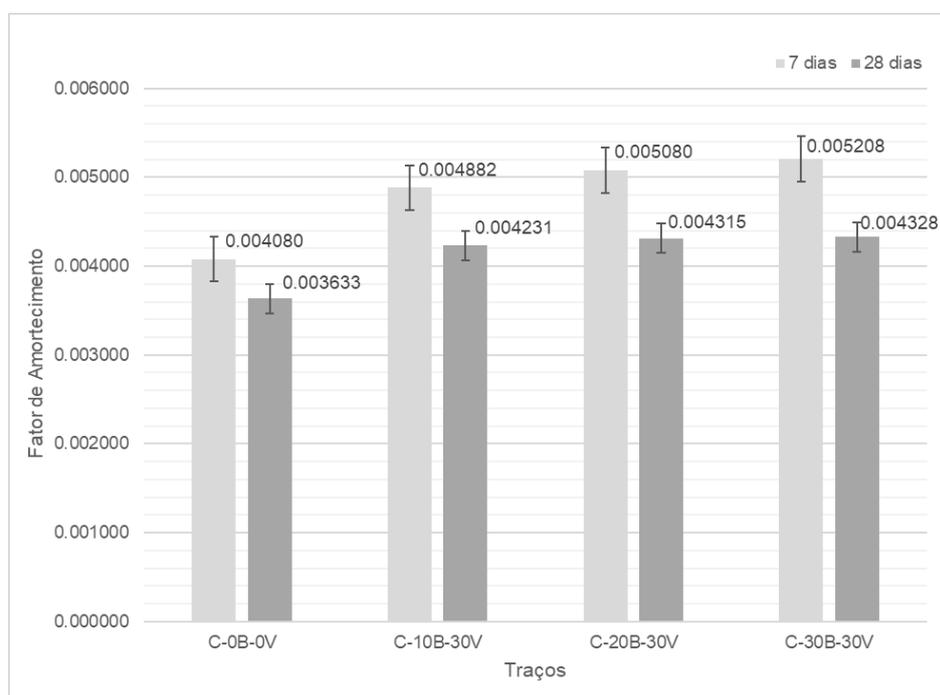
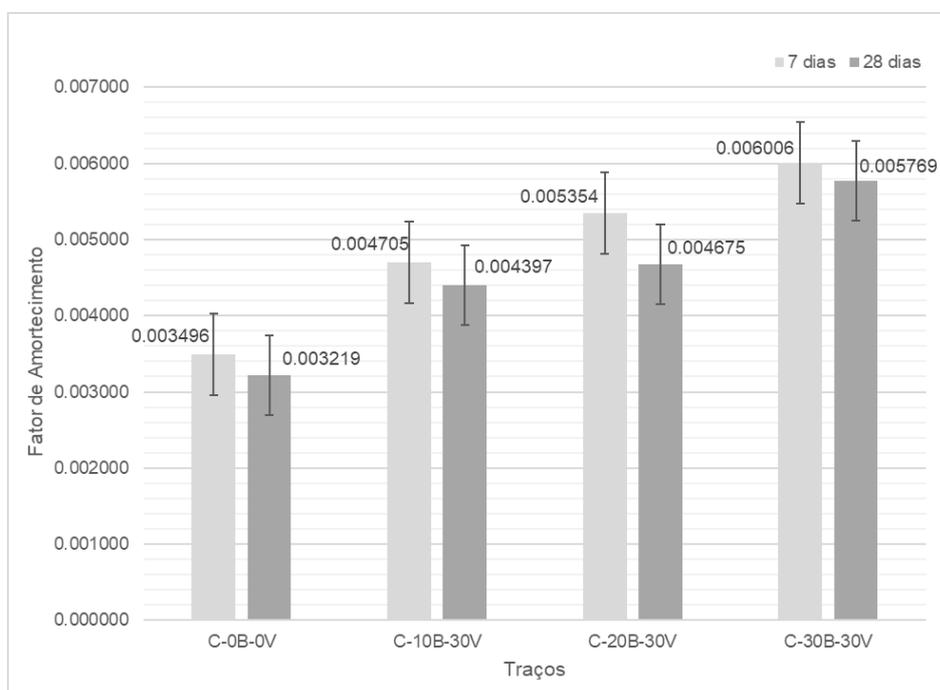


Figura 38: Resultados de fator de amortecimento flexional aos 7 e 28 dias.



Na Figura 37 com relação ao fator de amortecimento longitudinal aos 28 dias, pode-se observar uma tendência de crescimento linear do traço C-0B-0V para os demais, o traço C-10B-30V apresentou um aumento de 16% em relação ao traço de referência, o C-20B-30V um aumento de 18%, e o C-30B-30V um aumento de 19%.

Na Figura 38, para o fator de amortecimento flexional aos 28 dias, esta tendência é mais evidente, sendo de: 36% para o traço C-10B-30V, 45% para o traço C-20B-30V e 79% para o traço C-30B-30V, em relação ao traço de referência.

Estes resultados indicam que a incorporação de borracha e vermiculita ao concreto atribuem ao material melhor capacidade de dissipação de energia quando submetido a cargas dinâmicas (Li et al., 2019).

Padrão de comportamento similar ao encontrado nesta pesquisa foi relatado por Kaewunruen et al. (2018) que constataram um aumento da capacidade de amortecimento para uma substituição de 10% de agregado miúdo natural por resíduos de borracha. Moustafa e ElGawady (2015) também constataram que ao substituir 30% do agregado miúdo natural por resíduos de borracha o amortecimento apresentou um aumento de 30%.

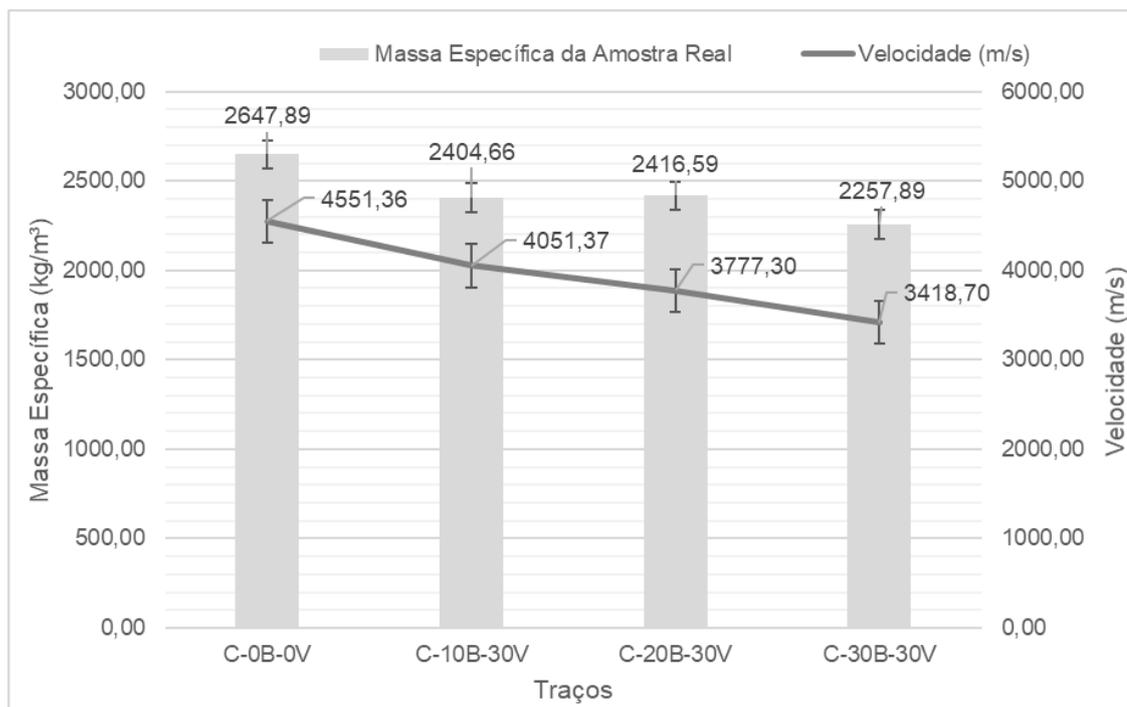
Hassalani; Youssf, Mills (2017); Li et al. (2019); Habib; Yildirim; Eren (2020) verificaram que o fator de amortecimento aumentou entre 5% e 91% para concretos com teores 0 a 25% de borracha.

Sridhar e Prasad (2019) relataram aumento de 3% a 20% no fator de amortecimento, para concretos com fração volumétrica de 0 a 1,25% de fibras.

4.3.6 Caracterização acústica

Os resultados referentes a caracterização acústica estão apresentados na Figura 39.

Figura 39: Resultados de velocidade de propagação de onda e massa específica aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 39 nota-se uma tendência de redução da velocidade de propagação de onda do traço C-0B-0V para os demais: o traço C-10B-30V apresentou uma queda de 10,99% em relação ao traço de referência, o C-20B-30V uma queda de 16,92%, e o C-30B-30V uma diminuição de 24,84%.

As imagens de MEV das Figuras 40 e 41 mostram o crescente número de vazios conforme há elevação nos teores de borracha, nos traços de concretos estudados, justificando os resultados encontrados para a velocidade de propagação de onda.

Comportamento semelhante ao encontrado nesta pesquisa foi relatado por Ma et al. (2023) onde a substituição de 10%, 20% e 30% do agregado miúdo pelo resíduo de borracha e 30% resíduo de vidro, apresentou redução de 4%, 10% e 24% de velocidade de propagação de onda.

Kashani et al. (2017) encontrou uma redução da velocidade de propagação de onda de 65% ao adicionar 30% de resíduo de borracha ao concreto celular.

Mohammed; Adamu e Shahir (2018); Wang; Wu e Cheng (2022) e Latelier et al. (2023) verificaram que em concretos com teores de 0 a 30% de borracha, houve diminuição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de 3% a 40%.

Esta tendência também foi verificada nos estudos de compósitos cimentícios com vermiculita segundo Dora; Barta e Mini (2023); Koksai; Sahin e Gencel (2020).

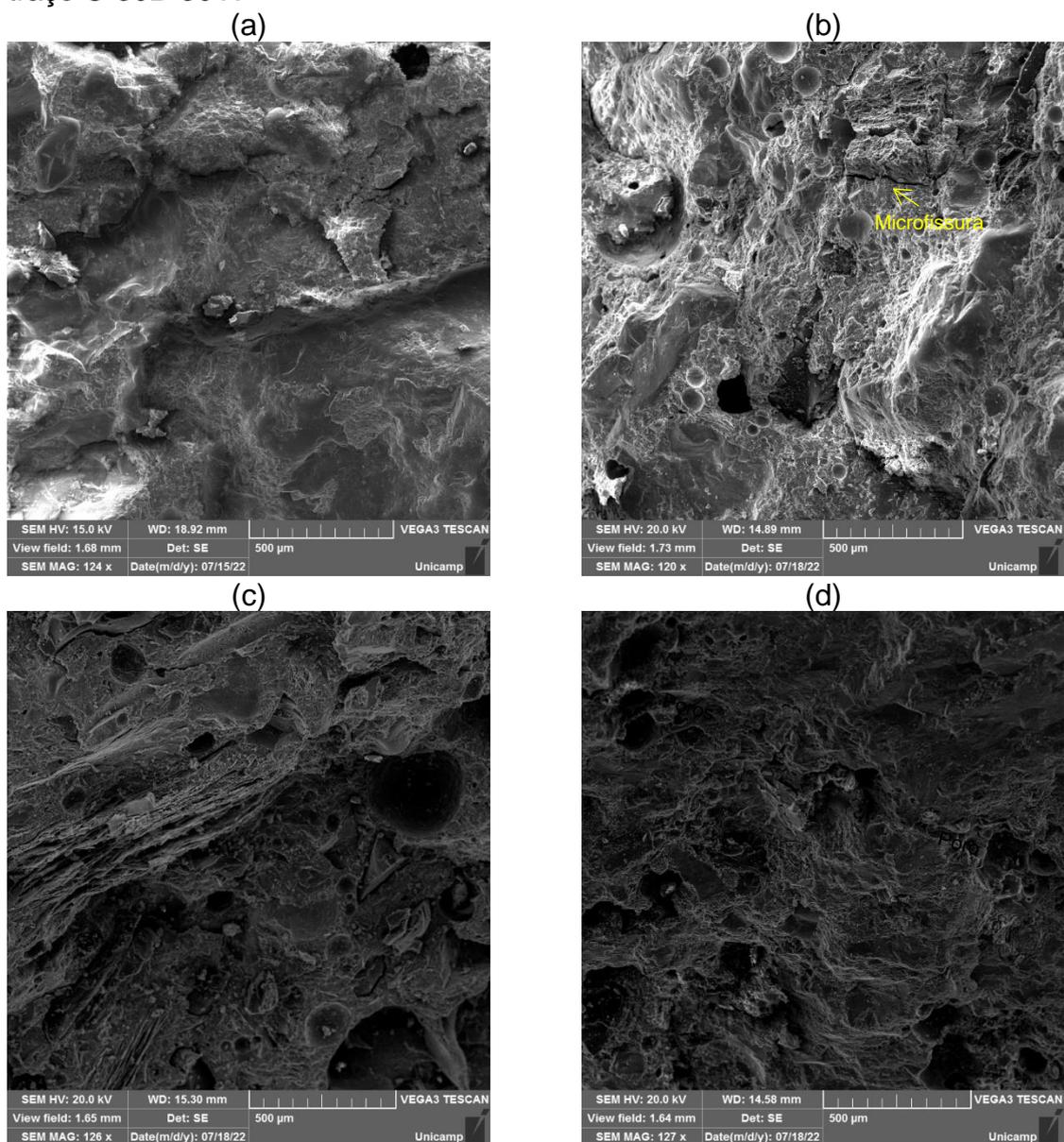
4.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os resultados referentes a microscopia eletrônica de varredura estão apresentados nas Figura 40 e na Figura 41.

Como pode ser observado na estrutura da matriz cimentícia da Figura 40 (a) para o traço C-0B-0V, tem-se uma superfície mais homogênea e lisa. Conforme a vermiculita e a borracha entram na mistura, a partir da Figura 40 (b), e o teor de borracha aumenta nas Figuras 40 (c) e (d), um número significativo de poros e vazios pode ser relatado na microestrutura dos compósitos. Este fato justifica o aumento no índice de vazios encontrado para o traço C-30B-30V.

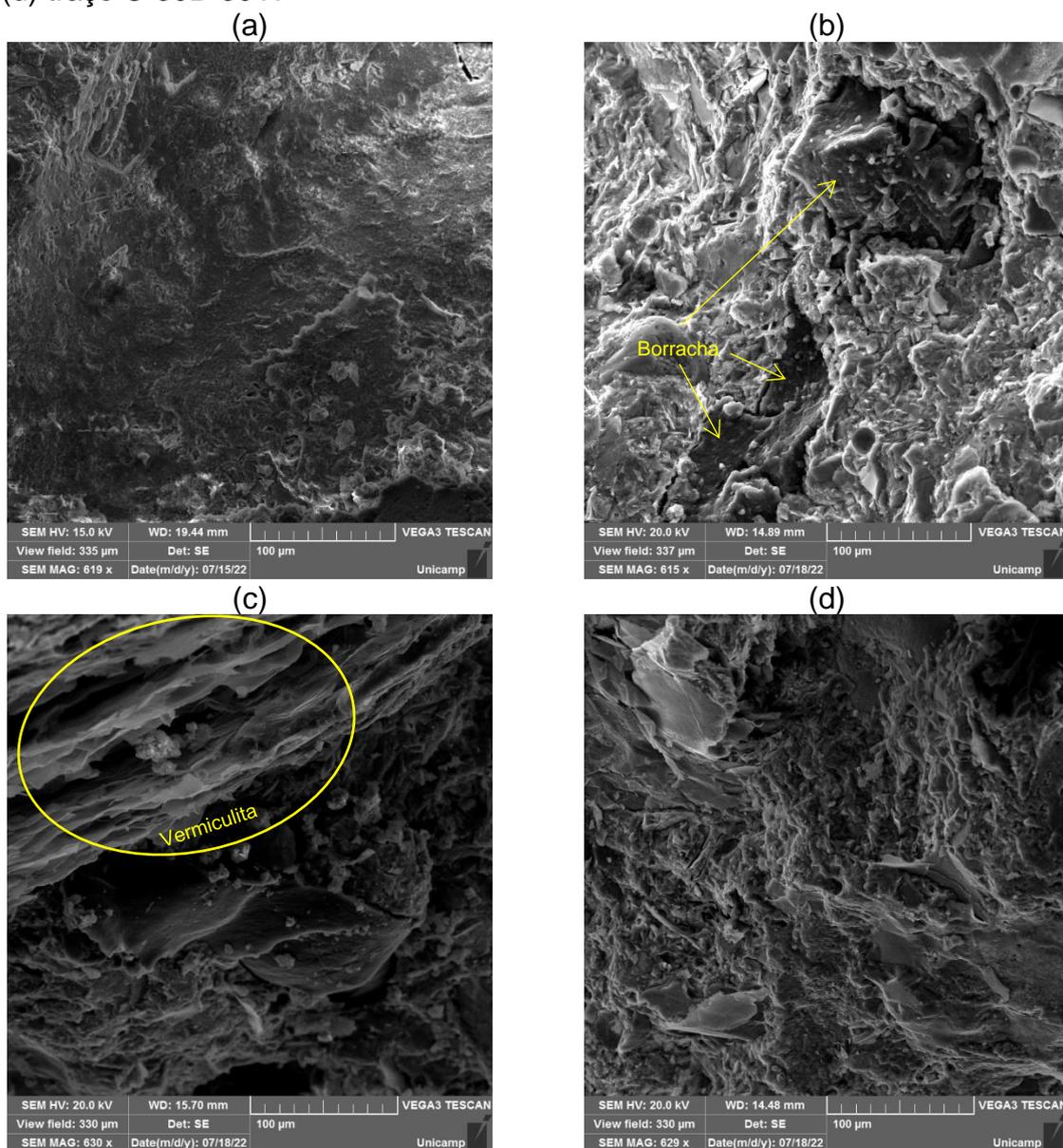
Na Figura 41 observa-se a fase de zona de transição entre a borracha e a matriz cimentícia (Figura 41 (b)), e os vazios contidos no interior das lâminas que constituem a vermiculita expandida (Figura 41 (c)), contribuem para a fragilização da microestrutura do concreto e o aumento de poros na matriz cimentícia.

Figura 40: Imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura dos concretos na escala de 500 μ m: (a) traço C-0B-0V, (b) traço C-10B-30V, (c) traço C-20B-30V e (d) traço C-30B-30V.



Fonte: Autor (2023).

Figura 41: Imagens de ensaio de microscopia eletrônica de varredura dos concretos nas escalas de 100 μ m (a) traço C-0B-0V, (b) traço C-10B-30V, (c) traço C-20B-30V e (d) traço C-30B-30V.



Fonte: Autor (2023).

Algumas constatações observadas nas imagens de MEV são: aumento da zona de transição e presença de microfissuras evidenciando a fragilidade dos concretos contendo borracha, justificando a diminuição das propriedades mecânicas dos concretos de acordo com o teor crescente de borracha e por outro lado melhorando o fator de amortecimento e o desempenho acústico do material, comparando-se ao concreto de referência (sem borracha).

4.4 Análise estatística

Foram realizadas análises estatísticas para os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, amortecimento e velocidade de propagação de onda. Os resultados dessas análises estão apresentados a seguir.

4.4.1 Resistência à compressão

A análise de variância ANOVA dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias estão apresentados na Tabela 13.

O produto das análises de variância realizada para os traços produzidos em função da substituição do agregado miúdo pela borracha e vermiculita expandida, estão expressos na Tabela 14. E, para que se fosse possível observar quais grupos apresentaram variação estatística foi realizado o teste de múltiplas comparações TUKEY, cujos resultados obtidos estão expressos na Figura 42.

Tabela 13: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

Poder amostral	99,48%
Desvio Padrão	14,612
Nível crítico de Significância	5%

Fonte: Autor (2023).

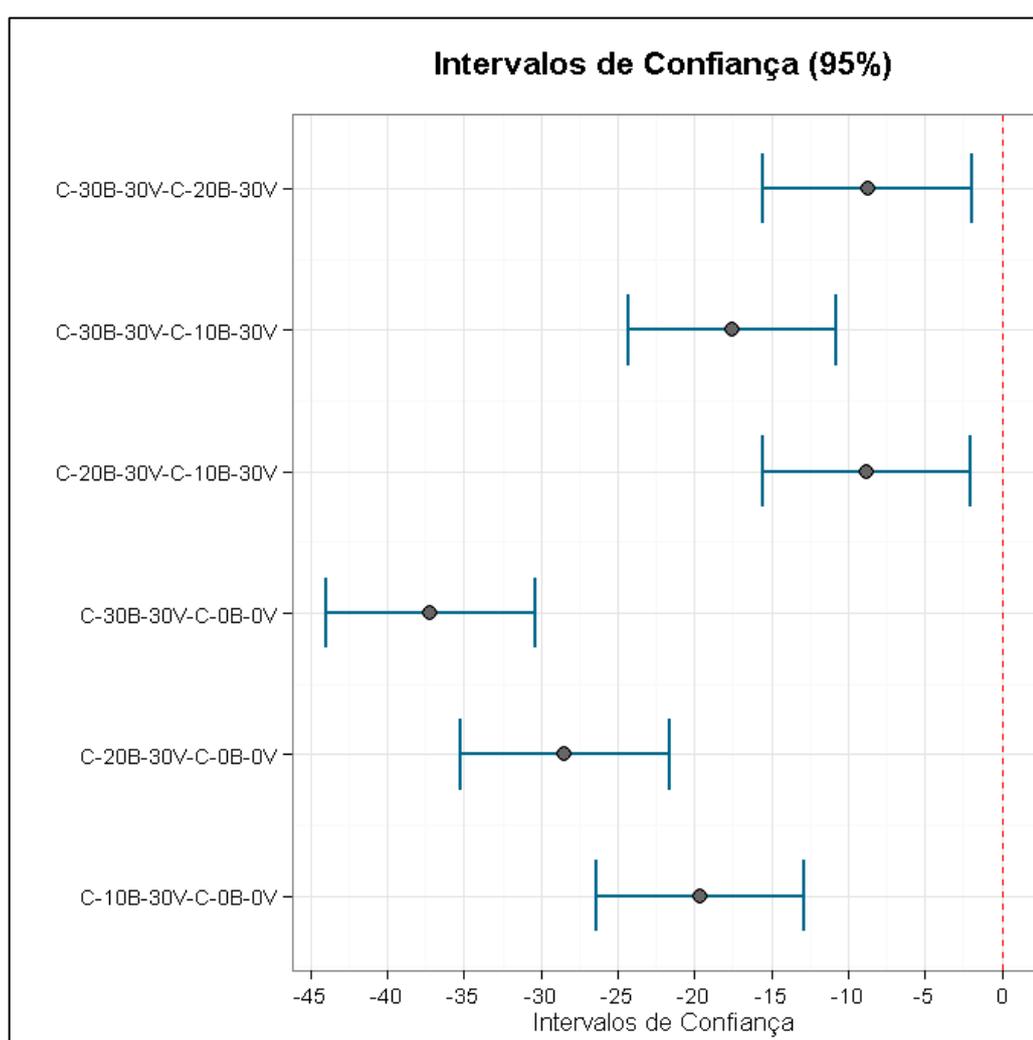
Tabela 14: Análise de variância dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-Valor
Fator	3	4.559,55	1.519,85	86,54	1,25E-11
Resíduos	20	351,25	17,56		

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, pode-se observar que para o grupo de corpos de prova ensaiados há uma diferença significativa na resistência a compressão aos 28 dias. O resultado obtido para o P-valor ($1,25E-11 < 0,05$) rejeita a hipótese nula (quando não há diferença dentre os grupos) em prol da hipótese alternativa (quando há diferença entre os grupos) ao nível crítico de risco de 5%, com uma significância de 95%.

Figura 42: Teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Por meio do teste de comparações múltiplas (método de Tukey) expresso na Figura 42, pode-se observar que para os valores médios, todos os traços apresentaram diferença estatística para a resistência à compressão.

4.4.2 Módulo de elasticidade dinâmico

A análise de variância ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias estão apresentados na Tabela 15. O produto das análises de variância realizada para os traços produzidos em função da substituição do agregado miúdo pela borracha e vermiculita expandida, estão expressos na Tabela 16. E para que se fosse possível observar quais grupos apresentaram variação estatística foi então realizado o teste de múltiplas comparações TUKEY, e os resultados obtidos estão expressos na Figura 43.

Tabela 15: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de módulo de elasticidade dinâmico.

Poder amostral	94,61%
Desvio Padrão	8,469
Nível de Significância	5%

Fonte: Autor (2023).

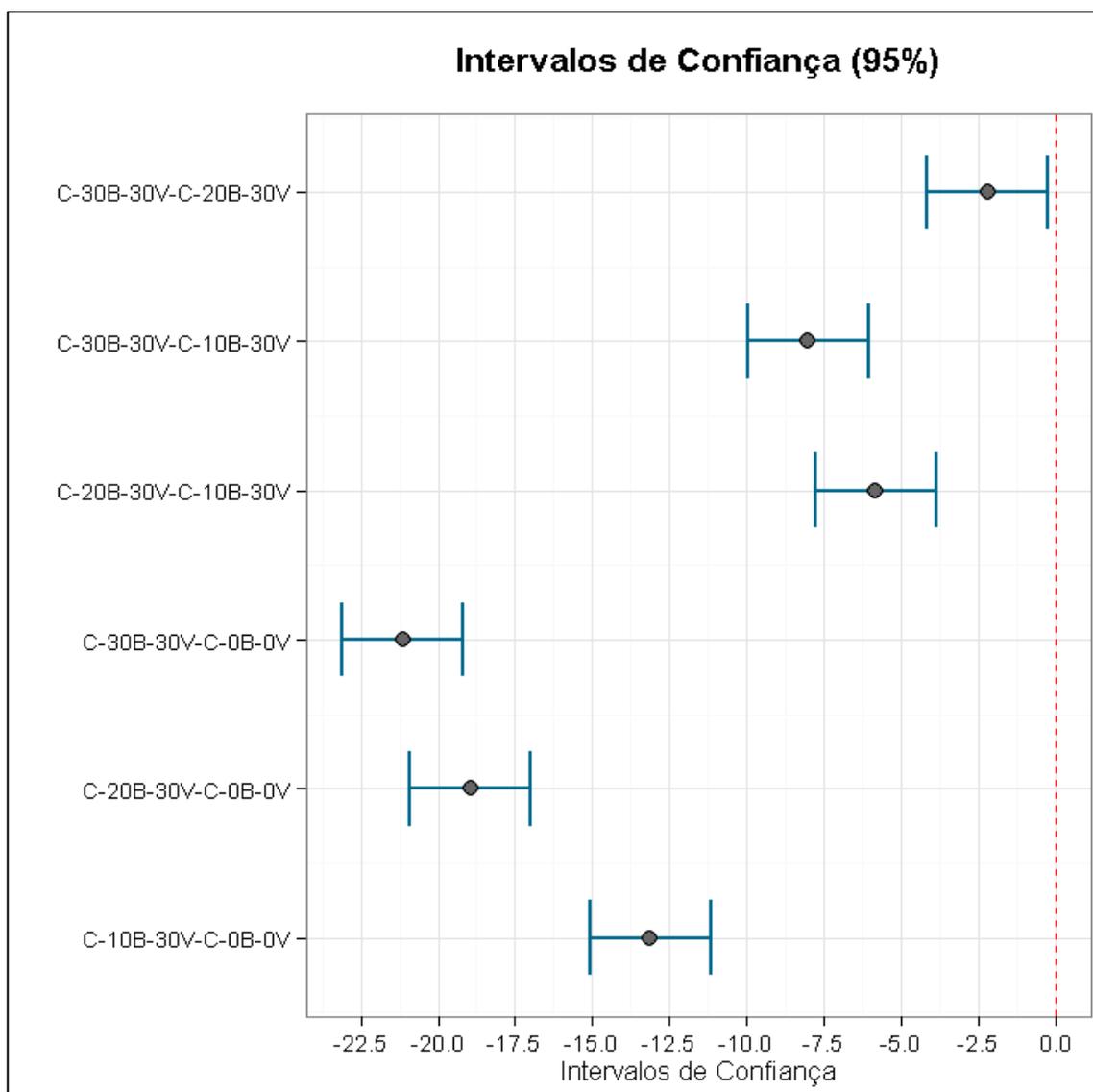
Tabela 16: Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-Valor
Fator	3	1.620,28	540,09	367,20	1,19E-17
Resíduos	20	29,42	1,47		

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 16, pode-se observar que para o grupo de corpos de prova ensaiados há uma diferença significativa no módulo de elasticidade aos 28 dias. O resultado obtido para o P-valor ($1,19E-17 < 0,05$) rejeita a hipótese nula (quando não há diferença dentre os grupos) em prol da hipótese alternativa (quando há diferença entre os grupos) ao nível crítico de risco de 5%, com uma significância de 95%.

Figura 43: Teste de Tukey para comparação das médias do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Através do teste de comparações múltiplas (método de Tukey) expresso na Figura 43, nota-se que para os valores médios, todos os traços apresentaram diferença estatística para o módulo de elasticidade dinâmico.

4.4.3 Fator de amortecimento

A análise de variância ANOVA dos resultados de fator de amortecimento aos 28 dias estão apresentados na Tabela 17.

O produto das análises de variância realizada para os traços produzidos em função da substituição do agregado miúdo pela borracha e vermiculita expandida, estão expressos na Tabela 18. E para que se fosse possível observar quais grupos apresentaram variação estatística foi então realizado o teste de múltiplas comparações TUKEY, e os resultados obtidos estão expressos na Figura 44.

Tabela 17: Nível de Significância e desvio padrão - resultados de fator de amortecimento.

Poder amostral	99,98%
Desvio Padrão	0,000352
Nível de Significância	5%

Fonte: Autor (2023).

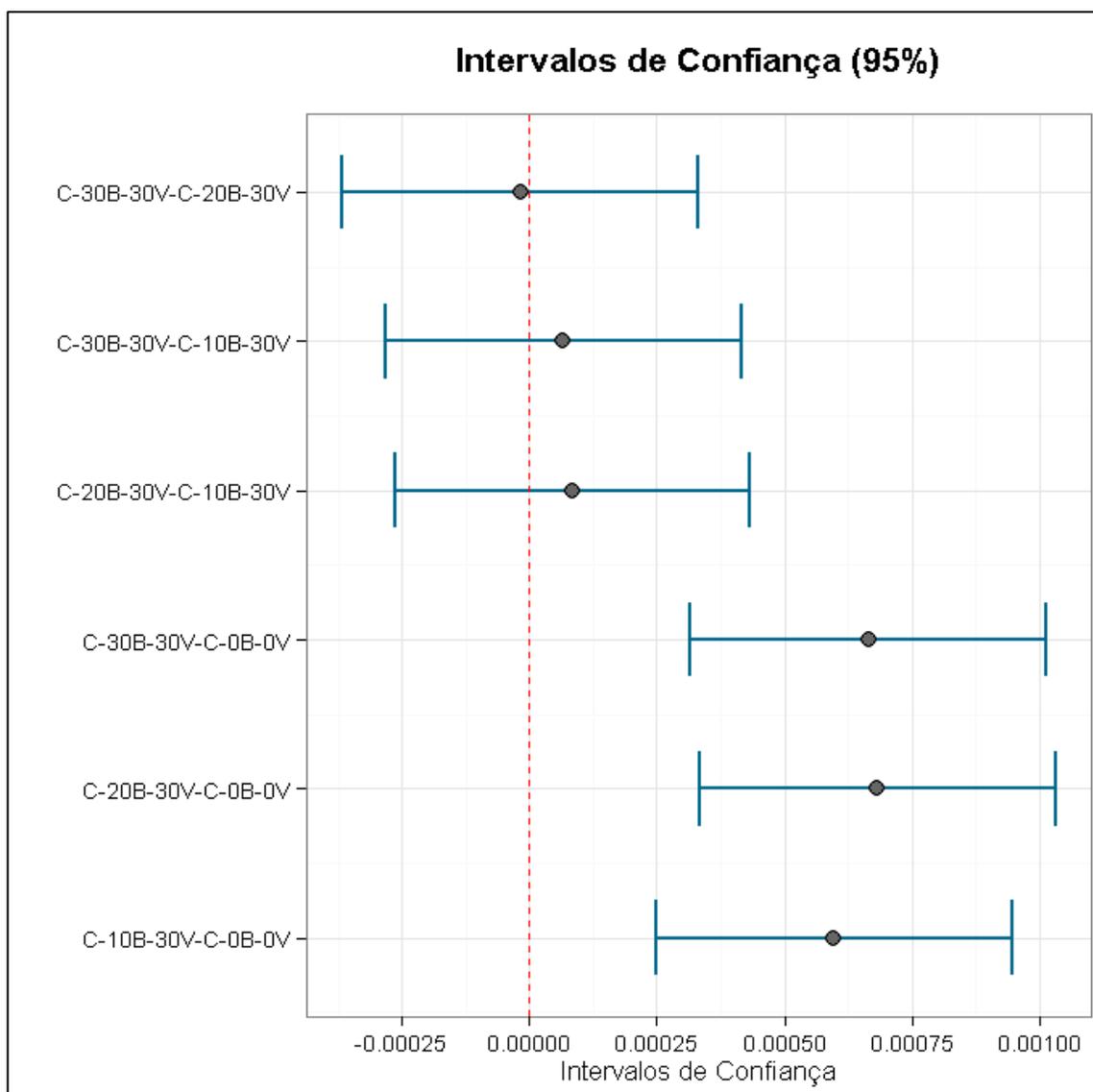
Tabela 18: Análise de variância dos resultados do fator de amortecimento aos 28 dias.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-Valor
Fator	3	1,91E-06	6,37E-07	13,72	4,34E-05
Resíduos	20	9,30E-07	4,65E-08		

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 18, pode-se observar que para o grupo de corpos de prova ensaiados há uma diferença significativa no fator de amortecimento aos 28 dias. O resultado obtido para o P-valor ($4,34E-5 < 0,05$) rejeita a hipótese nula (quando não há diferença dentre os grupos) em prol da hipótese alternativa (quando há diferença entre os grupos) ao nível crítico de risco de 5%, com uma significância de 95%.

Figura 44: Teste de Tukey para comparação das médias do fator de amortecimento aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Através do teste de comparações múltiplas (método de Tukey) apresentado na Figura 44 é possível visualizar quais grupos apresentam diferença significativa quando comparados entre si. Nota-se que a média do fator de amortecimento dos concretos apresenta diferença estatística para os grupos onde há substituição do agregado miúdo pela borracha e vermiculita expandida em relação ao traço de referência. Contudo, não apresentam diferença estatística significativa entre si quando comparados os níveis 10, 20 e 30% de substituição.

4.4.4 Velocidade de propagação de onda

A análise de variância ANOVA dos resultados de velocidade de propagação de onda, aos 28 dias, estão apresentados na Tabela 19. Os resultados da análise de variância entre os grupos em função do teor de substituição do agregado miúdo pela borracha e vermiculita expandida estão apresentados na Tabela 20. Para identificar para quais grupos houve variação estatística foi utilizado o teste de comparações múltiplas TUKEY, e os resultados estão apresentados na Figura 45.

Tabela 19: Nível de Significância e desvio padrão - resultados da velocidade de propagação de onda aos 28 dias.

Poder amostral	99,72%
Desvio Padrão	0,44444
Nível de Significância	5%

Fonte: Autor (2023).

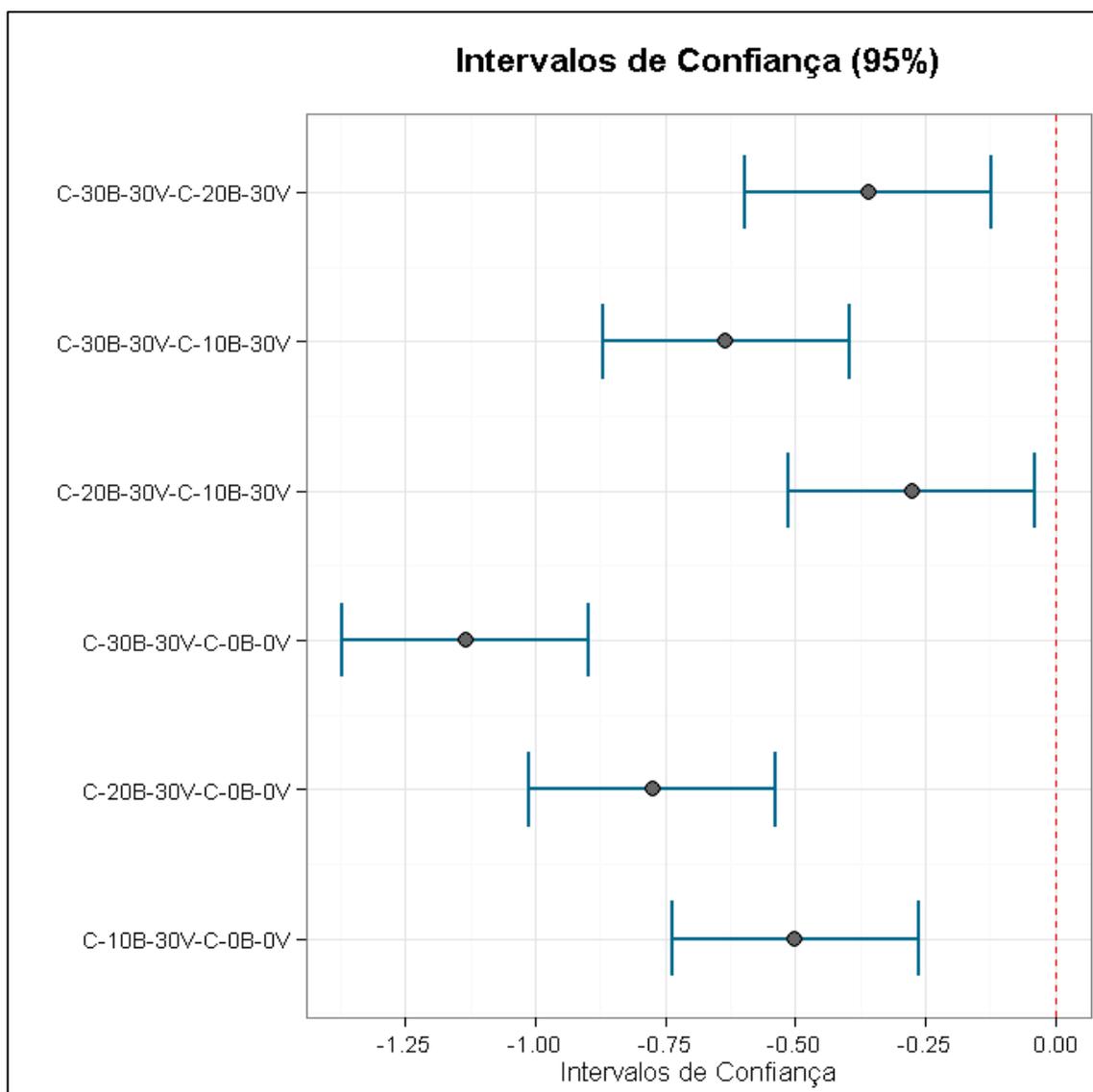
Tabela 20: Análise de variância dos resultados de velocidade de propagação de onda, aos 28 dias.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-Valor
Fator	3	4,11	1,37	63,49	2,12E-10
Resíduos	20	0,43	0,02		

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 20, pode-se observar que para o grupo de corpos de prova ensaiados há uma diferença significativa na velocidade de propagação de onda, aos 28 dias. O resultado obtido para o P-valor ($2,12E-10 < 0,05$) rejeita a hipótese nula (quando não há diferença dentre os grupos) em prol da hipótese alternativa (quando há diferença entre os grupos) ao nível crítico de risco de 5%, com uma significância de 95%.

Figura 45: Teste de Tukey para comparação das médias de velocidade de propagação de onda aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Através do teste de comparações múltiplas (método de Tukey) expresso na Figura 45, nota-se que para os valores médios, todos os traços apresentaram diferença estatística para os valores de velocidade de propagação de onda.

4.5 Possíveis aplicações para o material

A seguir estão listados alguns elementos que poderiam utilizar os concretos desenvolvidos nesta pesquisa:

- Barreiras de isolamento acústico, como forma de conter parcialmente o ruído gerado em rodovias e centros urbanos;
- Barreiras de contenção em rodovias;
- Pavimentos rodoviários, portuários e aeroportuários;
- Bases de máquinas ferramenta;
- Fundações em locais sujeitos a esforços e abalos sísmicos.

5. CONCLUSÃO

Com relação aos resultados obtidos no estudo realizado pode-se chegar à conclusão de que:

- no estado fresco dos concretos analisados, para maiores porcentagens de resíduos de borracha e vermiculita, foi necessário utilizar maiores teores de aditivo para que se atingisse o intervalo de abatimento pretendido de 125 + 25mm, uma vez que foi fixada a relação $a/c=0,50$;
- com maiores teores de borracha nos traços de concreto, houve redução da massa específica. Isto está associado à baixa massa específica da borracha e da vermiculita expandida, quando comparadas ao agregado miúdo natural;
- uma vez que o teor de vermiculita se manteve constante 30% nos traços C-10B-30V, C-20B-30V e C-30B-30V a borracha mostrou ser a responsável pelo aumento da absorção de água e índice de vazios dos concretos à medida que seus teores crescentes foram sendo incorporados às misturas;
- no estado endurecido dos concretos, pode-se verificar que os resultados da resistência à compressão, resistência à tração, o módulo de elasticidade estático e dinâmico, apresentaram diminuição de acordo com o aumento do teor de borracha nas misturas;
- por outro lado, o fator de amortecimento longitudinal teve um aumento na faixa entre 16% a 19% e o fator de amortecimento flexional teve um crescimento mais evidente correspondendo ao intervalo de 36% a 79%. A velocidade de propagação de onda teve uma redução na faixa de 11-25%, mostrando melhor desempenho acústico para o traço C-30B-30V;
- por meio do ensaio de MEV pode-se melhor compreender os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, os quais foram afetados pela presença da borracha e da vermiculita na matriz cimentícia as quais foram responsáveis pelo aumento de vazios, microfissuras e evidência da zona de transição;
- com relação a resistência à compressão, os traços C-0B-0V, C-10B-30V e C-20B-30V são classificados como estruturais segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), pois apresentaram resistência à compressão acima de 20MPa. Entretanto, o traço com 30% de borracha e 30% de vermiculita (C-30B-30V) apresentou desempenho acústico

e taxa de amortecimento superior aos demais traços de concretos ensaiados, sendo indicado para elementos sem função estrutural, que requerem tais características.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se para o estudo em trabalhos futuros:

- análise de custo para concretos com resíduos de borracha de pneus, vermiculita expandida e fibras de aço;
- estudo das propriedades de concretos com diferentes teores de borracha e vermiculita em substituição ao agregado miúdo;
- avaliação da influência do emprego de diferentes granulometrias de resíduos de borracha ao concreto;
- realização de tratamentos na borracha para diminuir a zona de transição interfacial e melhorar a incorporação da mesma à matriz cimentícia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELALEEM, B.H.; ISMAIL, M.K.; HASSAN, A.A.A. The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, v.162, p.816-829, 2018.

AFROUGHSAKET, V.; OZBAKKALOGLU, T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, v.94, p.73-82, 2015.

AKBARI, M. et al. Investigating fracture characteristics and ductility of lightweight concrete containing crumb rubber by means of WFM and SEM methods. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v.117, 103148, 2022.

ALFERES FILHO, R.S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A.D. Avaliação do grau de orientação de fibras de aço induzida na moldagem de elementos planos com concreto autoadensável. *Matéria*, v.24, n.2, 2019.

ALIABDO, A.A.; ABD ELMOATY, A.E.M.; ABDELBASET, M.M. Utilization of waste rubber in non-structural applications. *Construction and Building Materials*, v.91, p.195-207, 2015.

ALMEIDA, S. M. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. 2012. 213 p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ALSHAHRANI, Abdullah; KULASEGARAM, Sivakumar; KUNDU, Abhishek. Elastic modulus of self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental approach and multi-scale simulation. *Case studies in construction Materials*, v.18, e01723, 2023.

ALVES, H.; OTANI, L.B. Informativo técnico-científico ITC-07 - Determinação dos módulos de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso (ABNT NBR 8522-1&2:2021, 2022. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-07-IET-MOE-Concretos-PT-v1.5.pdf>. Acesso em: 29/mai/2023.

ALTHEMAN, D.; GACHET, L.A.; PIRES, M.S.; LINTZ, R.C.C. Water treatment waste as supplementary cementitious material. *Materials Today: Proceedings*, v.1, p.1-7, 2023.

ANGELIN, A.F.; Miranda Junior E.J.P.; Santos, J.M.C.; Osório, W.R.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A. Acoustic and Thermal Analyses of Self-Consolidating Lightweight Rubberized Concretes. *ACI Materials Journal*, v.119, p.53-64, 2022.

ANGELIN, A.F.; MIRANDA, E.J.P.; SANTOS, J.M.C. DOS; LINTZ, R.C.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.

ANGELIN, A.F. et al. Evaluation of efficiency factor of a self-compacting lightweight concrete with rubber and expanded clay contents. *Construction and Building Materials*, v.257, p.119573, 2020.

ARAUJO, G.S.; IWAMOTO, L.C.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A. Influence of Incorporation and Dimension of Expanded Polystyrene on Lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, v.118, p.79-90, 2021.

ARJOMANDI, A. et al. The effect of sulfuric acid attack on mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete containing waste nylon aggregates: Experiments and RSM-based optimization. *Journal of Building Engineering*, v.64, 105500, 2023.

ASSAGGAF, R.A. et al. Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review *Journal of Materials Research and Technology*, v.11, p.1753-1790, 2021.

ASSAGGAF, R.A. et al. Cost-effective treatment of crumb rubber to improve the properties of crumb-rubber concrete, *Case Studies in Construction Materials*, v.16, e00881, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11355: Vermiculita expandida — Análise granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-2: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2:

Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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 ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

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

ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens; designation: C215-19. ASTM International, 2019.

ASTM E1876: Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration; designation: E1876-21. ASTM International, 2021.

ATHIYAMAAN, V.; GANESH, M. G. Experimental, statistical and simulation analysis on impact of micro steel – Fibres in reinforced SCC containing admixtures. Construction and Building Materials, v. 246, 118450, 2020.

BATISTA, L.S.; SILVA, F.M.; GACHET, L.A.; LINTZ, R.C.C. Alternative materials in cementitious composites for noise control. ACI Materials Journal, v.119, p.129-137, 2022.

BECKER, A.R. et al. Study of mechanical, acoustic, and microstructure properties of lightweight mortars produced with expanded clay. Materials Today: Proceedings, v.65, part 2, p.1222-1229, 2022.

BINICI, H. et al. The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production. Thermal Science and Engineering Progress, v.18, 100567, 2020.

CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G. Fundamentals of Materials Science and Engineering. WILEY, 5 ed., 2015.

CAO, Y. et al. Mechanical behavior of FRP confined rubber concrete under monotonic and cyclic loading. *Composite Structures*, v.272, 114205, 2021.

CHAI, L. et al. Mechanical properties of ecological high ductility cementitious composites produced with recycled crumb rubber and recycled asphalt concrete. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v.21, n.3, p.488-502, 2019.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1.ed.São Paulo:IBRACON, v.1, p.381-413, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 1999. Resolução CONAMA nº 258/2008 – Revisão da Resolução nº 258/99, sobre a coleta e destinação final ambientalmente adequada de pneus inservíveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, Brasil.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 1999. Resolução CONAMA nº 301/2002 – Altera dispositivos da Resolução no 258, de 26 de Agosto de 1999, que dispõe sobre Pneumáticos. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, Brasil.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 1999. Resolução CONAMA nº 416/2009 – Dispõe sobre a prevenção à degradação Ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, Brasil.

DORA, S.; BARTA, R.B; MINI, K.M. Study on foam concrete incorporated with expanded vermiculite/capric acid PCM – A novel thermal storage high-performance building material. *Construct and Building Material*, v.392, p.131903-131903, 2023.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G.C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap.37, v.2, p.1327-1365.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A.A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, v.23, n.5, p.1828-1836, 2009.

GHASEMI, M.; GHASEMI, M.R.; MOUSAVI, S.R. Studying the fracture parameters and size effect of steel fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v.201, p.447-460, 2019.

GOMES, A.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A. Desempenho Térmico de Argamassas com Resíduos de borracha. In: 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóia. Associação Brasileira de Cerâmica, 2020, v.1. p.1-9.

GRAVINA, R.J.; XIE, T. Toward the development of sustainable concrete with Crumb Rubber: Design-oriented Models, Life-Cycle-Assessment and a site application. *Construction and Building Materials*, v.315, p.125565, 2022.

GUO, S. et al. 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.

GUO, Q. et al. Prediction on damage evolution of recycled crumb rubber concrete using quantitative cloud image correlation. *Construction and Building Materials*, v.209, p.340–353, 2019.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R.K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v.73, p.562-574, 2014.

HABIB, A.; YILDIRIM, U.; EREN, O. Mechanical and dynamic properties of high strength concrete with well graded coarse and fine tire rubber. *Construction and Building Materials*, v.246, p.118502, 2020.

HASSAN, A.M.S. et al. Evaluation of the thermo-physical, mechanical, and fire resistance performances of limestone calcined clay cement (LC3)-based lightweight rendering mortars. *Journal of Building Engineering*, v.71, 106495, 2023.

HASSANLI, R.; YOUSSEF, O.; MILLS, J.E. Experimental investigations of reinforced rubberized concrete structural members. *Journal of Building Engineering*, v.10, p.149-165, 2017.

HE, L. et al. Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*, v.35, 101991, 2021.

HEDJAZI, S.; CASTILLO, D. Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers. *Heliyon*, v.6, n.3, e03646, 2020.

HUANG, Z. et al. Dynamic compressive behavior of a novel ultra-lightweight cement composite incorporated with rubber powder. *Composite Structures*, v. 244, 112300, 2020.

ISAIA, G. C. A água no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1.ed.São Paulo:IBRACON, v.1, p.311-346, 2011.

KAEWUNRUEN, S. et al. Enhancement of Dynamic Damping in Eco-Friendly Railway Concrete Sleepers Using Waste-Tyre Crumb Rubber. *Materials*, v.11, n.7, p.1169, 2018.

KASHANI, A. et al. A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete. *Journal of Cleaner Production*, v.149, p.925-935, 2017.

KARATAS, M.; BENLI, A.; TOPRAK, H.A. Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, v.221, p.163-176, 2019.

KOKSAL, F.; GENCEL, O; KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v.88, p.175-187, 2015.

KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENCEL, O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, v.236, p.117789, 2020.

KOTWAL, S.; SINGH, H.; KUMAR, R. Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates. *Materials Today: Proceedings*, v.48, p.1032-1037, 2022.

LETELIER, V. et al. Properties of mortars containing crumb rubber and glass powder. *Developments in the Built Environment*, v.14, p.100131-100131, 2023.

LI, N. et al. Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: A comprehensive study. *Journal of Cleaner Production*, v.236, 117707, 2019.

LI, Z. et al. Effects of steel fiber on the flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with BFRP rebars under repeated loading. *Composite Structures*, v.270, 114072, 2021.

LIN, Q. et al. Comprehensive modification of emulsified asphalt on improving mechanical properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, v.369, 130555, 2023.

LINTZ, R.C.C. et al. Barreira rodoviária acústica de concreto sustentável. In: 35° ANPET, 2021.

LIU, J. et al. Physical and mechanical properties of expanded vermiculite (EV) embedded foam concrete subjected to elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, v.16, e01038, 2022.

MA, Q. et al. Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, v.49, n.11, Part A, p.16951-16970, 2023.

MARTINS, M.A.; BARROS, R.M.; DA SILVA, L.R.R.; DOS SANTOS, V.C.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A.; MELO, M.L.; MARTINEZ, C.B. Durability indicators of high-strength self-compacting concrete with marble and granite wastes and waste foundry exhaust sand using electrochemical tests. *Construction and Building Materials*, v.317, p.125907, 2022.

MEI, S.; WANG, Y. Viscoelasticity: A new perspective on correlation between concrete creep and damping. *Construction and Building Materials*, v.265, p.120557, 2020.

MEI, X. et al. Experimental investigation on the mechanical and damping properties of rubber-sand-concrete prepared with recycled waste tires for aseismic isolation layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v.165, p.107718, 2023.

MEYYAPPAN, PL. et al. Experimental studies on partial replacement of crumb rubber as a fine aggregate in M30 grade concrete. *Materials Today: Proceedings*, v. 74, p. 985–992, 2023.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. CONCRETO: Microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON, 2 ed., 2014.

MO, K.H. et al. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, v.179, p.302-306, 2018.

MOHAMMED, B.S.; ADAMU, M.; LIEW, M. S. Evaluating the effect of crumb rubber and nano silica on the properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques. *Case Studies in Construction Materials*, v.8, p.380-391, 2018.

MOUSTAFA, A.; ELGAWADY, M.A. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, v.93, p.249-256, 2015.

NEMATZADEH, M.; HOSSEINI, S.-A.; OZBAKKALOGLU, T. The combined effect of crumb rubber aggregates and steel fibers on shear behavior of GFRP bar-reinforced high-strength concrete beams, *Journal of Building Engineering*, v. 44, 102981, 2021.

NANJEGOWDA, V.H.; BILIGIRI, K.P. Utilization of high contents of recycled tire crumb rubber in developing a modified-asphalt-rubber binder for road applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v.192, p. 106909, 2023.

NARULE, G.N.; ULAPE, Y.B. Performance on steel fiber reinforced concrete using metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

NAVEENKUMAR, K. et al. Experimental investigation flexural behavior of reinforced concrete beam with partial replacement of vermiculite, *Materials Today: Proceedings*, v. 46, Part 12, p. 5885-5888, 2021.

NEVILLE, A. M. (2016) *Propriedades do concreto*. 5.ed. Porto Alegre: Bookman.

PACHECO, J. et al. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: 56 Congresso Brasileiro do Concreto, Natal-RN. São Paulo: IBRACON, v.1. p.1-14, 2014.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, G.C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap.16, v.1, p. 585-614.

PENTEADO, C.S.G. et al. Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. *Ambiente Construído (Online)*, v.19, p.21-32, 2019.

RABEHI, R.; RABEHI, M.; OMRANE, M. Physical-mechanical and fresh state properties of self-compacting concrete based on different types of gravel reinforced with steel fibers: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, v.390, 2023.

RASHAD, A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, v.125, p.53-62, 2016.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Concreto Autoadensável. In: ISAIA, G.C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap.42, v. 2, p.1531-1568.

SCHACKOW, A. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*, v.57, p.190-197, 2014.

SEGRE, N. et al. Rubber-mortar composites: Effect of composition on properties. *Journal of Materials Science*. v.39, p.3319-3327, 2004.

SHEHATA, L.C.D. Propriedades elasto-plásticas do concreto. In: ISAIA, G.C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap.18, v. 1, p.653-672.

SHELORKAR, A.P.; JADHAO, P.D. Effect of varying water cement ratio on modulus of elasticity of high-performance fibre-reinforced concrete (HPFRC). *Materials Today: Proceedings*, 2022.

SIDHU, A.S.; SIDDIQUE, R. Utilisation of crumb tire rubber in development of sustainable metakaolin based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, v.345, p.128412, 2022.

SILVA, F.M.; BATISTA, L.S.; GACHET, L.A.; LINTZ, R.C.C. The Effect of Tire-Rubber Pretreatment on the Physical-Mechanical Properties and Durability of High-Performance Concrete. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, v.34, p.1-12, 2022.

SILVA, F.M. et al. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). *Revista Matéria*, v.22, n.1, 2017.

SILVA, F.M. et al. The use of tire rubber in the production of high-performance concrete. *Cerâmica*, v.65, p.110-114, 2019.

SRIDHAR, R.; PRASAD, R. Vibration Based Damaged Detection of Steel Fiber Reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, v.18, p.3321-3329, 2019.

SUVOROV, S.A., SKURIKHIN, V.V. Vermiculite - a promising material for high-temperature heat insulators. *Refractories and Industrial Ceramics*, v.44, p.186–193, 2003.

THOMAS, B.S.; GUPTA, R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.54, p.1323-1333, 2016.

UGARTE, J.F.O.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. VERMICULITA. In: Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações – CETEM, Rio de Janeiro, 2005. Cap.32, p.677-698.

XAVIER, B.C. et al. Study of three distinct self-compacting concretes containing marble/granite powder and hooked-end steel fiber contents. *Journal of Composite Materials*, v. 55, p.2823-2838, 2021.

WANG, H.; WU, Y.; CHENG, B. Mechanical properties of alkali-activated concrete containing crumb rubber particles. *Case Studies in Construction Materials*, v.16, e00803, 2022.

WU, Y.-F. et al. Effect of compression casting method on the compressive strength, elastic modulus and microstructure of rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*, v.264, p.121746, 2020.

YANG, G. et al. Influence of rubber powder size and volume fraction on dynamic compressive properties of rubberized mortar. *Powder Technology*, v.420, 118376, 2023.

YILMAZ, A.; DEGIRMENCI, N. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste Management*, v.29 p.1541-1546, 2009.

YUE, J.G.; WANG, Y.N.; BESKOS, D.E. Uniaxial tension damage mechanics of steel fiber reinforced concrete using acoustic emission and machine learning crack mode classification, *Cement and Concrete Composites*, v.123, 104205, 2021.

ZHANG, X.; LIN, X.; CHEN, Y. Study on mechanical properties of steel fiber reinforced nano-concrete (SFRNC) after elevated temperature. *Composite Structures*, v.268, 113941, 2021.

SITES CONSULTADOS:

GRUPO TECNOSIL. TecnoSil – Soluções especiais. - Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 16 de jun. de 2022.

LAFARGE HOLCIM

Disponível em: <https://www.lafargeholcim.com.br>. Acesso em: 16 de jun. de 2022.

INDÚSTRIA NACIONAL DE PNEUMÁTICOS RELATÓRIO AMBIENTAL 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1HTOThcPTrXm4f0I93-xd3SEBYDz8k6Tf/view>. Acesso em: 26 jun. 2022.

MC-BAUCHEMIE (Relatório Aditivo Superplastificante). Disponível em: https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%201180.pdf. Acessado em: 09 de jun de 2023.