

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de Doutorado

**Estudo de concreto autoadensável aplicado à bases de  
máquinas-ferramenta**

**Amaurí Ernesto Gomes**

Dezembro de 2020

Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de Doutorado

**Amaurí Ernesto Gomes**

**Estudo de concreto autoadensável aplicado à bases de  
máquinas-ferramenta**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientadora: Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Coorientadora: Profa. Dra. Luísa Andréia Gachet

Dezembro de 2020

Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de Doutorado

**Amaurí Ernesto Gomes**

**Estudo de concreto autoadensável aplicado à bases de  
máquinas-ferramenta**

Tese aprovada por banca examinadora em 11 de dezembro de 2020,  
conferindo ao autor o título de Doutor em Engenharia Mecânica.

**Banca Examinadora:**

Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo (orientadora)

Prof. Dra. Maria Rachel de Araújo Russo

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Prof. Dra. Regina Mambeli Barros

Prof. Dr. Wislei Riuper Osório

Profa. Dra. Andressa Fernanda Angelin

Dezembro de 2020

Itajubá - MG

## **DEDICATÓRIA**

*À minha família, aos mestres, que me mostraram o verdadeiro valor da honestidade e da persistência.*  
*À Rosa, minha esposa, minha escolha, meu amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus sempre presente em minha vida.

À Universidade Federal de Itajubá e à Faculdade de Tecnologia da UNICAMP pela oportunidade e realização desta pesquisa de doutorado em parceria.

Às Professoras Dr.<sup>a</sup> Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo e Dr.<sup>a</sup> Luísa Andréia Gachet, por toda orientação, paciência, amizade, fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, Emerson Verzegnassi, Reginaldo Ferreira, Diego Leandro Thomaz e aos bolsistas, pelo apoio e suporte na realização dos ensaios.

Aos alunos Beatriz Correa Xavier, Lui Cesar Iwamoto, Lucas Silveira Batista pela ajuda e contribuições.

Ao Instituto de Geociências da UNICAMP e à técnica do Laboratório Érica Martini Tonetto, pelo auxílio nas análises de microscopia dos concretos.

Ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e ao pesquisador Roberto Cesar de Oliveira Romano.

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

Às empresas que doaram os materiais utilizados nesta pesquisa: Belgo Mineira, Mc Bauchemie e LIMERCAP Pneus.

*“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?”*

*Isaac Newton*

## RESUMO

As bases de máquinas-ferramenta são tradicionalmente construídas com ferro fundido e aço, possuindo como desvantagem, o baixo amortecimento. Em um primeiro momento, nesta pesquisa de forma inovadora, estuda-se um material alternativo aos tradicionais, e sua aplicação na fabricação das bases de máquinas-ferramenta. Esse compósito cimentício é formado pelo concreto autoadensável (CAA) armado com fibras de aço, contendo resíduos de borracha e resíduos de mármore e granito. Sabe-se que um dos maiores problemas de rigidez dinâmica na construção dessas bases, é a taxa de amortecimento. Diante disso, no presente trabalho discutem-se os níveis crescentes de resíduos de borracha na mistura do concreto, indicando uma melhor capacidade do concreto em absorver energia, mostrando-se um bom material alternativo utilizado na fabricação dessas bases. Vale ressaltar que, com a incorporação da borracha no concreto, a microestrutura apresentou um maior número de vazios e, conseqüentemente, houve perda de resistência mecânica. Para mitigar essa redução, foram incorporados resíduos de mármore e granito na mistura, pois, estes finos preenchem os poros, aumentam o empacotamento das partículas, evitam a redução da resistência e o aumento da permeabilidade do concreto. A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para observação da microestrutura resultante. Foram desenvolvidos seis traços de concreto, realizados ensaios de caracterização física dos materiais e avaliados os comportamentos dos concretos tanto no estado fresco como no estado endurecido. Nos ensaios executados no estado fresco dos concretos avaliaram-se: trabalhabilidade, viscosidade plástica, estabilidade visual e habilidade passante. No estado endurecido dos concretos, foram analisadas as propriedades: resistências à compressão e à tração, fator de amortecimento, módulo de elasticidade estático e dinâmico. A massa específica também foi verificada no estado fresco e endurecido. Analisando os dados, nota-se que a taxa de amortecimento aumentou mais de 46% em relação aos materiais usuais empregados na fabricação de bases de máquinas-ferramenta, e que todas as composições de CAA estudadas foram classificadas como concreto estrutural segundo a ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015a). Vale destacar os benefícios ambientais decorrentes do reaproveitamento desses materiais na produção do concreto, que de outra forma, provavelmente seriam descartados em aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.

**PALAVRAS-CHAVE:** bases de máquinas-ferramenta, concreto autoadensável, resíduo de borracha, resíduo de mármore e granito, fator de amortecimento.

## ABSTRACT

Machine tool bases are traditionally manufactured with cast iron and steel, with a low damping disadvantage. At first, in this research as an innovative way, an alternative material to traditional ones, and their application in the manufacture of machine tool bases are investigated. This cementitious composite is formed by a steel fibers-reinforced self-compacting concrete (SCC), containing both rubber and marble and granite residue contents. It is known that one of the biggest drawback of dynamic rigidity in the construction of these bases, is the damping rate. In view of this, in this present work the increasing levels of rubber residues in the concrete mixture, is discussed. Also, is indicated a better ability of the concrete to absorb energy, evidencing a good alternative material to be used in the manufacture of these bases. It is worth noted that, with the incorporation of rubber in the concrete, the microstructure has a greater number of voids and, consequently, a loss of mechanical strength is provided. In order to mitigate this reduction, the marble and granite residues are incorporated. These fines fill the pores, increase the packaging of the particles, is increased and concrete strength is decreased, while the permeability is increased. A scanning electron microscope is used in order to observe the resulting microstructural array. Six concrete mix are developed, and physical material characterization tests are carried out and fresh and hardened states are evaluated. The fresh properties of the concretes are: workability, plastic viscosity, visual stability and passing ability. The hardened properties are: compressive strength, tensile strength, damping factor, static and dynamic moduli of elasticity. The specific gravity is also checked for both the fresh and hardened states. Analyzing the data, it is noted that the damping rate is increased more than 46% in relation to the usual materials used in the manufacture of machine tool bases. Additionally all studied CAA compositions are classified as structural concrete according to ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015a). It is worth noted the environmental benefits resulting from the reuse of these materials in the production of concrete, which will probably be disposed into landfills for class A civil construction and inert waste.

**KEYWORDS:** machine tool bases, self-compacting concrete, rubber residue, marble and granite residue, damping factor.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	16
<b>1.1 Relevância e justificativa da escolha do tema</b>	17
<b>1.2 Objetivos</b>	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	20
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
<b>2.1 Bases de máquinas-ferramenta</b>	21
<b>2.2 Concreto autoadensável (CAA)</b>	26
2.2.1 Materiais constituintes do CAA	28
2.2.1.1 Cimento	28
2.2.1.2 Adições	28
2.2.1.3 Água	29
2.2.1.4 Agregados	29
2.2.1.4.1 Agregado graúdo	30
2.2.1.4.2 Agregado miúdo	30
2.2.1.5 Aditivos	31
2.2.1.5.1 Superplastificantes	31
2.2.1.5.2 Aditivos modificadores de viscosidade	31
2.2.1.6 Fibras	32
2.2.2 Propriedades do CAA no estado fresco	32
2.2.2.1 Ensaio de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual	33
2.2.2.2 Habilidade passante pelo método do anel J	34
2.2.2.3 Habilidade passante pelo método da caixa L	35
2.2.2.4 Viscosidade pelo método do funil V	35
2.2.3 Principais propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido	38
2.2.3.1 Resistência à compressão	38
2.2.3.2 Resistência à tração	38
2.2.3.3 Retração e fluência	39
2.2.3.4 Resistência à flexão	40
2.2.3.5 Tenacidade	40
2.2.3.6 Resistência à aderência da armadura	40
2.2.3.7 Módulo de elasticidade estático	41
2.2.3.8 Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)	44
2.2.3.9 Amortecimento	46
<b>2.3 Resíduo do beneficiamento do mármore e granito</b>	52
2.3.1 Fases do processo de fabricação de rochas ornamentais	54
2.3.2 Geração e aplicação dos resíduos de corte de mármore e granito (RCMG)	54
<b>2.4 Resíduo de borracha de pneu</b>	63
2.4.1 Aplicação dos resíduos de borracha de pneu em concretos	66
<b>2.5 Fibras de aço</b>	78
2.5.1 Concreto autoadensável com fibras de aço	81
<b>CAPÍTULO 3 – PARTE EXPERIMENTAL</b>	90
<b>3.1 Materiais empregados na pesquisa</b>	92
3.1.1 Cimento	92
3.1.2 Sílica ativa	92
3.1.3 Resíduos de Corte de Mármore e Granito	93
3.1.4 Agregado miúdo	94
3.1.5 Agregado graúdo	94

3.1.6 Resíduos de Borracha	95
3.1.7 Fibra	95
3.1.8 Aditivo	96
<b>3.2 Produção dos CAA</b>	97
<b>3.3 Ensaios realizados no estado fresco e endurecido dos concretos autoadensáveis</b>	98
3.3.1 Ensaios no estado fresco dos concretos autoadensáveis	98
3.3.2 Ensaios no estado endurecido dos concretos autoadensáveis	101
3.3.2.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	101
3.3.2.2 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral	102
3.3.2.3 Módulo de elasticidade estático	103
3.3.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento	103
3.3.2.5 Análise da microestrutura dos concretos autoadensáveis	106
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	107
<b>4.1 Resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais</b>	107
4.1.1 Cimento	107
4.1.2 Resíduos de Corte de Mármore e Granito (RCMG)	107
4.1.3 Agregado miúdo	109
4.1.4 Agregado graúdo	110
4.1.5 Resíduos de Borracha	111
<b>4.2 Resultados provenientes dos ensaios do CAA no estado fresco</b>	113
4.2.1 Ensaio de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual	114
4.2.2 Habilidade passante pelo método do anel J	117
4.2.3 Habilidade passante pelo método da caixa L	118
4.2.4 Viscosidade pelo método do funil V	120
4.2.5 Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	121
<b>4.3 Resultados provenientes dos ensaios do CAA no estado endurecido</b>	123
4.3.1 Determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão segundo a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2009d)	123
4.3.2 Ensaios Estáticos	127
4.3.2.1 Resistência à compressão e resistência à tração	127
4.3.2.2 Módulo de elasticidade estático	133
4.3.3 Ensaios Dinâmicos	134
4.3.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico	134
4.3.3.2 Fator de amortecimento	137
<b>4.4 Análise da microestrutura interna dos concretos</b>	140
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b>	147
<b>5.1 Conclusões</b>	147
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros</b>	148
<b>CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	149
<b>ANEXO A</b>	165

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conjunto placa-base e cone de Abrams.	34
Figura 2: Conjunto placa-base e anel J.	34
Figura 3: Caixa L - ensaio especificado na ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e).	35
Figura 4: Funil V empregado no ensaio especificado na ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f).	36
Figura 5: Comportamentos típicos das curvas tensão-deformação para o concreto e seus principais constituintes.	41
Figura 6: Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.	42
Figura 7: Definição dos módulos de elasticidade tangente inicial e secante.	42
Figura 8: Sistema linear com um grau de liberdade e amortecimento viscoso.	48
Figura 9: Resposta ao impulso de um sistema amortecido com um grau de liberdade, Figura 8, $0 < \zeta < 1$ , no instante $t = 0$ .	50
Figura 10: Resíduos de borracha, mármore e granito e fibras de aço empregados na composição do CAA, para construção de bases de máquinas-ferramenta.	89
Figura 11: Fluxograma das etapas da pesquisa.	91
Figura 12: Resíduo de mármore e granito empregado nesta pesquisa.	93
Figura 13: Resíduo de borracha empregado na produção do CAA.	95
Figura 14: Fibras de aço com ganchos nas extremidades empregada para a produção dos CAA.	96
Figura 15: Etapa de moldagem do CAA. (a) Material pesado para cada traço. (b, c) Mistura na betoneira. d) Corpos de prova de CAA produzidos.	98
Figura 16: Execução do ensaio de resistência à compressão.	102
Figura 17: Execução do ensaio de módulo de elasticidade estático.	103
Figura 18: (a) Medida da massa da amostra; (b) Realização de ensaio dinâmico por estímulo por impulso.	104
Figura 19: Etapas para determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos e razões de amortecimentos obtidos pela técnica de Excitação por Impulso.	105
Figura 20: (a) Metalizadora; (b) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	106
Figura 21: Distribuição granulométrica do RCMG.	108
Figura 22: Curva granulométrica da areia.	109
Figura 23: Curva granulométrica da brita.	110
Figura 24: Resultados do espalhamento para os traços estudados.	114
Figura 25: Resultados do $T_{500}$ para os traços de CAA estudados.	116
Figura 26: Resultados do Anel J para os traços de CAA estudados.	117
Figura 27: Resultados da caixa L para os traços de CAA estudados.	118
Figura 28: Resultados do Funil V para os traços de CAA estudados.	120
Figura 29: Resultados das massas específicas dos traços estudados.	122
Figura 30: Resultados do teor de ar incorporado dos traços estudados.	123
Figura 31: Resultados da absorção de água e índice de vazios dos traços estudados.	124
Figura 32: Resultados das massas específicas das amostras secas dos traços estudados.	125
Figura 33: Micrografia do concreto autoadensável: (a) T3 e (b) R3.	126
Figura 34: Resultados da resistência à compressão dos traços estudados.	128
Figura 35: Resultados da resistência à tração dos traços estudados, aos 7 e 28 dias.	131
Figura 36: Resultados do módulo de elasticidade estático dos traços estudados.	134
Figura 37: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, aos 28 dias de idade.	135
Figura 38: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.	137
Figura 39: Resultados do fator de amortecimento dos traços estudados, aos 28 dias.	138
Figura 40: MEV do concreto autoadensável de traço T1.	141

Figura 41: MEV do concreto autoadensável de traço R1.	142
Figura 42: MEV do concreto autoadensável de traço T2.	143
Figura 43: MEV do concreto autoadensável de traço R2.	144
Figura 44: MEV do concreto autoadensável de traço T3.	145
Figura 45: MEV do concreto autoadensável de traço R3.	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do concreto polimérico à base de quartzo.	23
Tabela 2: Características de diferentes materiais	24
Tabela 3: Amortecimentos modais identificados.	25
Tabela 4: Propriedades mecânicas dos materiais empregados em estruturas de máquinas-ferramenta.	25
Tabela 5: Fator de amortecimento viscoso equivalente para diferentes materiais.	26
Tabela 6: Algumas propriedades do concreto empregado na fabricação de base de máquinas.	26
Tabela 7: Propriedades no estado fresco do CAA.	37
Tabela 8: Propriedades no estado fresco do CAA segundo a ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).	38
Tabela 9: Equações para estimativa do módulo de elasticidade de concretos.	44
Tabela 10: Expressões empíricas que relacionam os módulos estático ( $E_c$ ) e dinâmico ( $E_d$ ).	46
Tabela 11: Tipos de rochas produzidas em 2018, no Brasil.	53
Tabela 12: Resultados de trabalhos relacionadas a CAA com resíduos de mármore e granito.	57
Tabela 13: Evolução do mercado de reposição de pneus novos (em toneladas).	66
Tabela 14: Tecnologia de destinação final e quantidade total de pneus inservíveis destinados em 2018.	66
Tabela 15: Pesquisas relacionadas a concreto com resíduos de borracha.	68
Tabela 16: Tolerâncias para comprimento e diâmetro das fibras.	79
Tabela 17: Classificação e perfil das fibras de aço.	80
Tabela 18: Resultados de pesquisas de CAA com fibras de aço, no estado fresco.	83
Tabela 19: Resultados de pesquisas de CAA com fibras de aço, no estado endurecido.	84
Tabela 20: Características do aditivo usado para a produção do CAA.	96
Tabela 21: Traços, em massa, dos CAA estudados nesta pesquisa.	97
Tabela 22: Características da granulometria do RCMG pelo Método Laser.	108
Tabela 23: Resultados do ensaio de granulometria da areia.	109
Tabela 24: Características físicas da areia.	109
Tabela 25: Resultados do ensaio de granulometria da brita.	110
Tabela 26: Características físicas da brita.	110
Tabela 27: Análise química da borracha, obtida por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS).	111
Tabela 28: Massa bruta, segundo a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a), da borracha de pneu inservível.	111
Tabela 29: Ensaio de lixiviação ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004b) – Parâmetros inorgânicos da borracha de pneu inservível.	112
Tabela 30: Ensaio de solubilização ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c) – Parâmetros inorgânicos da borracha de pneu inservível.	112
Tabela 31: Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco.	113
Tabela 32: Classificação dos traços de acordo com as classes de espalhamento.	114
Tabela 33: Resultados de pesquisas referentes ao ensaio de espalhamento.	115
Tabela 34: Classificação dos traços de acordo com as classes de viscosidade plástica aparente $t_{500}$ .	116
Tabela 35: Classificação dos traços de acordo com as classes de habilidade passante pelo anel J.	117
Tabela 36: Classificação dos traços de acordo com as classes de habilidade passante pela caixa L.	118

Tabela 37: Resultados de pesquisas referentes a habilidade passante pela caixa L.	119
Tabela 38: Classificação dos traços de acordo com as classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V.	120
Tabela 39: Resultados de pesquisas referentes a viscosidade plástica.	121
Tabela 40: Características dos traços estudados.	122
Tabela 41: Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão.	124
Tabela 42: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.	127
Tabela 43: Resultados dos ensaios de resistência à tração, aos 7 e 28 dias de idade.	127
Tabela 44: Resultados de pesquisas referentes a resistência à compressão.	129
Tabela 45: Resultados de pesquisas referentes a resistência à tração.	132
Tabela 46: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático, aos 7 e 28 dias de idade.	133
Tabela 47: Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias de idade.	134
Tabela 48: Ganho no valor de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal em relação ao módulo de elasticidade estático.	135
Tabela 49: Resultados do fator de amortecimento aos 28 dias de idade.	137
Tabela 50: Aumento do fator de amortecimento dos concretos ensaiados em relação ao aço e ferro fundido.	139
Tabela 51: Resultados de pesquisas referentes a módulo de elasticidade e fator de amortecimento.	139

## LISTA DE SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
Ca,MgFe(CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	ankerita
CAA	Concreto Autoadensável
CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub>	dolomita
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
Ec	Módulo de deformação estático
Ed	Módulo de deformação dinâmico
EFNARC	European Federation of National Trade Associations
fcm	resistência média à compressão do concreto
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FeCO <sub>3</sub>	siderita
IBAMA	Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis
IEV	Índice de estabilidade visual
INMETRO	Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia
MgCO <sub>3</sub>	magnesita
NBR	Norma brasileira registrada
PL ou PJ	Habilidade passante
RBMG	resíduo do beneficiamento do mármore e granito
RCD	resíduos de construção e demolição
RCMG	Resíduos de Corte de Mármore e Granito
SF	Fluidez e escoamento
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
TEI	Técnica de Excitação por Impulso
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
VF ou VS	Viscosidade plástica aparente
ZT	Zona de Transição

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Comprovadamente um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto. Suas características de resistência, durabilidade e facilidade de aplicação justificam sua imensa utilização. As propriedades mecânicas inerentes ao material são valorizadas pelos projetistas, pois satisfazem as solicitações que as estruturas das edificações são submetidas. O concreto atende ao conceito de sustentabilidade pois, em sua fabricação, permite incorporar resíduos em sua composição propiciando tanto economia de matéria-prima como de energia, minimizando a emissão de gases tóxicos ao meio ambiente (ISAIA, 2011).

Segundo a norma brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 6118 (ABNT, 2014), para concretos estruturais, a resistência à compressão mínima deve ser 20 MPa. As edificações em geral, requerem além de resistência, características de consistência adequada para cada tipo de serviço, suficientes para o lançamento e adensamento do concreto nas peças estruturais, que acontece quase sempre com a utilização de vibradores de imersão. Existem casos em que as peças de concreto estruturais possuem altas taxas de armadura e os vibradores de imersão não conseguem penetrar na peça, deixando de adensar o material. O concreto por sua vez, precisa envolver completamente as armaduras de aço que o compõem, para que o conjunto ao ser solicitado possa trabalhar solidariamente (GOMES e BARROS, 2009).

O Professor Okumara, da Universidade de Tóquio, em 1986, no Japão, desenvolveu o “Concreto Autoadensável” (CAA) devido a alta sismicidade daquela região geográfica que requer o uso de elevada taxa de armadura de aço na construção. Este tipo de concreto surgiu como uma solução para melhorar o preenchimento de zonas pouco acessíveis aos métodos convencionais de compactação de concreto (LOUKILI, 2011).

Segundo Repette (2008), o CAA apresenta alta fluidez, deformabilidade e estabilidade da mistura. Essas três características básicas e essenciais conferem ao CAA: capacidade de ocupar espaços nas fôrmas, passar por obstáculos e resistir à segregação.

O CAA é caracterizado pela grande capacidade de fluxo, sem a perda de estabilidade em espaços estreitos ou obstáculos, sendo este um dos principais fatores que influem na qualidade final do concreto endurecido, seja ele convencional ou autoadensável (EFNARC, 2002).



Quanto à composição do CAA, o que o difere do concreto comum é o emprego de grande quantidade de materiais finos, uso de aditivos químicos superplastificantes, que proporciona à mistura maior fluidez e coesão e, eventualmente, moderador de viscosidade.

A capacidade deste tipo de concreto de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços é denominada fluidez. Já a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir é medido pela resistência à segregação. Segundo Mesquita et al. (2009), o que ainda contribui para a obtenção deste concreto é o alto volume de pasta e menor diâmetro característico máximo do agregado graúdo.

Assim, o surgimento do CAA na década de 80 é considerado, mundialmente, um grande avanço tecnológico, impulsionando o desenvolvimento de diversas pesquisas que abordam suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido (ANGELIN et al., 2015; ANGELIN et al., 2018; ALYOUSEF et al., 2018; BOUKHELKHAL et al., 2016).

## **1.1 Relevância e justificativa da escolha do tema**

As pedras naturais, tanto ornamentais como de revestimento, compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser explorados em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de esquadrejamento, polimento, lustro etc. Nas edificações, suas principais utilizações se dão em pilares, pisos, paredes, soleiras, revestimentos internos e externos. São também empregadas na fabricação de esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária em geral. Comercialmente são subdivididas em granitos e mármores, e outros tipos, como os quartzitos, serpentinitos, travertinos e ardósias (BRASIL, 2009).

Estima-se que no ano de 2020, a produção mundial de rochas ornamentais ultrapassará a casa dos 150 milhões de toneladas (Mt), correspondentes a quase 1,8 bilhões de m<sup>2</sup> equivalentes por ano. Um grande desafio para o setor de rochas no Brasil, está relacionado ao aproveitamento dos rejeitos de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. O rejeito corresponde a aproximadamente a 41% do processamento de rochas brutas (CHIODI FILHO, 2018).

Assim, verifica-se que os Resíduos de Corte de Mármore e Granito (RCMG) têm sido gerados em grande escala em todo o mundo.

Algumas iniciativas com relação à produção mais limpa e produção sustentável no setor estão sendo aplicadas em Minas Gerais, onde existe o Banco de Boas Práticas Ambientais,

criado pela FEAM e pela FIEMG, cujo objetivo é incentivar e divulgar o desenvolvimento de iniciativas voltadas para a ecoeficiência dos processos, com a produção de bens e serviços com uso menos intensivo de recursos naturais, com menor degradação ambiental, sem desperdício e melhor controle da poluição (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2015).

Existem diversas formas de se utilizar estes resíduos como matérias-primas industriais e no setor da construção civil, seja na composição de concretos e argamassas como em materiais cerâmicos. A reutilização destes resíduos na fabricação de concretos tem sido estudada e tem apresentado uma ótima alternativa contribuindo para a redução de agregados naturais não renováveis, diminuindo o consumo de energia. Tem também contribuído para evitar a disposição inadequada deste passivo ambiental na natureza (XAVIER et al., 2020).

Dessa forma, neste trabalho, o RCMG é empregado na produção de CAA, na forma de finos, uma vez que este produto requer características especiais de fluidez e necessita de materiais finos em sua composição.

Em paralelo, também é grande a quantidade de geração de pneus inservíveis trazendo preocupações para diversos segmentos da economia. Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), desde 1999, mais de 3 milhões de toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 625 milhões de pneus de passeio, foram coletados e destinados adequadamente até o final de 2014. Somente em 2018 a quantidade de pneus destinados adequadamente foi de 566.323,84 toneladas.

Os pneus inservíveis dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que podem resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. A necessidade de assegurar que esse passivo seja destinado de forma ambientalmente adequada e segura, fez com que o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovasse em 1999 a Resolução nº 258 (CONAMA, 1999). Esta passou por uma série de atualizações em 2002 e 2009 e hoje a Resolução nº 416 (CONAMA, 2009) está em vigor.

A partir da entrada em vigor desta Resolução, para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível.

Muitas pesquisas têm sido realizadas no setor da construção civil, com relação ao aproveitamento de resíduos de pneus inservíveis como agregados para concretos e argamassas. Produtos à base de cimento como telha, tubos, blocos de concreto e pisos intertravados também podem ser fabricados com o emprego destes resíduos, sendo muitos os benefícios com a sua incorporação (SANTOS, 2005; VASCONCELOS, 2009; SILVA JUNIOR, 2014; SILVA,

2014; TRENTIN et al., 2015; DA SILVA et al., 2015; AKASAKI et al., 2016; FRONZA, 2016; SILVA et al., 2017; ANGELIN et al., 2019; SILVA et al., 2019).

Diversos pesquisadores têm estudado o CAA com incorporação de agregados leves e resíduos de borracha e têm obtido bons resultados (ANGELIN et al., 2015; ANGELIN et al., 2018; ANGELIN et al., 2020; BRESSAN et al., 2019).

Na fabricação de bases de máquinas-ferramenta são requeridas propriedades como altas rigidezes estáticas à flexão e à torção. Uma característica importante no seu comportamento dinâmico é a vibração gerada durante o processo de usinagem. Tais vibrações provocam níveis de amplitude de deslocamento relativo entre a ferramenta de corte e a peça trabalhada que comprometem o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais exigidas no processo de fabricação da peça acabada. Este mecanismo impede a utilização de velocidades de corte mais elevadas no processo de usinagem, caracterizando-se como um óbice à redução dos tempos de produção e, conseqüentemente dos custos do produto (SIDDHPURAA e PAUROBALLYA, 2012). Materiais tradicionalmente utilizados como o ferro fundido e o aço soldado possuem desvantagens como baixa rigidez e amortecimento, e grande consumo de energia na sua produção.

A originalidade desta pesquisa consiste tanto no desenvolvimento de um material, com características para uso estrutural, alternativo aos tradicionais, empregados na fabricação de bases de máquinas-ferramenta, como no estudo de suas propriedades. Esse compósito cimentício é formado pelo CAA armado com fibras de aço, contendo resíduos de borracha e resíduos de mármore e granito.

E, também como consequência deste processo contemplam-se as questões de sustentabilidade ao se destinar adequadamente os resíduos gerados pelos respectivos setores da economia: Indústrias de Rochas Ornamentais e Indústria de Pneumáticos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Obter e caracterizar um novo material para ser utilizado na fabricação de bases de máquinas-ferramenta.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, é necessário:

- Produzir um novo compósito cimentício formado pelo CAA armado com fibras de aço, contendo resíduos de borracha e resíduos de mármore e granito;
- Avaliar a influência da incorporação de resíduos de borracha, de mármore e granito e fibras de aço na composição do CAA, nas suas propriedades do estado fresco e endurecido;
- Analisar as propriedades mecânicas do CAA (resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade estático) e as propriedades dinâmicas (módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento);
- Densificar a matriz do concreto reduzindo os vazios gerados pela incorporação de finos e avaliar a microestrutura do material.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Bases de máquinas-ferramenta

Máquina-ferramenta é um equipamento utilizado para dar acabamento, desbaste, retífica, entre outros processos envolvidos, na fabricação de componentes de diversos materiais (metais, madeira, cerâmicas etc.). Entre as máquinas-ferramenta estão o torno mecânico, a fresadora, a aplainadora, a retificadora, e outras. Atualmente, são utilizadas máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) onde todas as operações são basicamente controladas por computadores.

Uma máquina-ferramenta é constituída por uma base, coluna, dispositivos de movimentação e dispositivos de controle. Os materiais que a compõem devem atender às seguintes exigências: estabilidade térmica (baixo coeficiente de dilatação), química, rigidez estática à flexão e à torção e rigidez dinâmica (frequência natural e fator de amortecimento) (MÖHRING et al., 2015; DUNAJ; BERCZYŃSKI; CHODŹKO, 2020).

A máquina-ferramenta em operação, atinge altas velocidades de corte e elevadas rotações, e por isso sua base deve possuir também excelente estabilidade dimensional e geométrica (MAHENDRAKUMAR; SYATHABUTHAKEER; MOHANRAM, 2014).

A vibração, que ocorre nos processos de usinagem, é um fenômeno físico, provocado por níveis de amplitude de deslocamento relativo entre a ferramenta de corte e a peça trabalhada que comprometem o acabamento superficial e a precisão dimensional estipulados para a peça acabada. E, além disso outros problemas podem ocorrer como quebra de componentes da máquina-ferramenta, ruído excessivo, quebra e redução da vida útil da ferramenta (ZHANG et al., 2015).

As bases de máquinas-ferramentas, devem suportar, com segurança, as combinações mais severas de carregamentos estáticos e dinâmicos. Associadas a estas especificidades, estão as exigências de facilidade no processo de fabricação, baixo custo final e utilização econômica no decorrer de sua utilização. Além disso, têm por finalidade servir de superfície de apoio para os outros componentes que constituirão a máquina-ferramenta como um todo. Esses componentes podem ser guias, sistemas de acionamentos, conjunto de instrumentos de medição

e controle, mecanismos de segurança, motores elétricos, bombas hidráulicas ou pneumáticas, tubulações, transportadores de cavacos e resíduos úmidos e fluidos, etc. (STOETERAU, 2004).

A escolha apropriada do material da base da máquina-ferramenta pode minimizar em parte o problema de rigidez dinâmica elevando o fator de amortecimento.

Os materiais tradicionalmente empregados na produção das bases de máquinas-ferramenta são o aço e o ferro fundido. Estes materiais são facilmente moldados em formas complexas e de usinagem, apresentando alto grau de precisão. Mas, apresentam desvantagens como: baixo amortecimento, grande retração durante o arrefecimento, elevado consumo de energia na fundição antes da moldagem, tempo de produção longo, alto custo e necessidade de tratamento anticorrosivo.

Para minimizar estes efeitos tem sido proposto, desde a década de 70, o emprego de outros materiais, que possuem as propriedades requeridas, para a fabricação de máquina-ferramenta, tais como: concreto, concreto polimérico, concreto reforçado com fibras, argamassa reforçada com fibras, argamassa de cimento de alto desempenho armada e argamassa de polímero (DUCATTI; SANTOS; LINTZ, 2006; SWAMY et al., 2014; SHMIDT e DEGTYAREVA, 2017; YIN J.; ZHANG J.; WANG W., 2019).

Em 1977, no Instituto de Tecnologia de Darmstadt, Koblischek e seus colaboradores desenvolveram um concreto polimérico composto de calcita de estrutura cristalina romboédrica, quartzo de estrutura cristalina tetragonal, 99,5% de  $\text{SiO}_2$  e resina de polimetacrilato, denominado Motema-AC sendo empregado em base máquina-ferramenta em 1980 (KOBLSCHKEK, 1985).

Na década de 80, o Professor McKeown, da Universidade Cranfield, desenvolveu o granito sintético, denominado GRANITAN S-100 (McKEOWN et al., 1990). Com o passar do tempo, este compósito é aperfeiçoado em concreto polimérico à base de quartzo, com a mistura de agregado de quartzo de cerâmica pura de dióxido de silício (99,8%) e resina epóxi de alta resistência e aditivos, e se tornou um produto comercial utilizado na fabricação de bases de máquinas, cujas características estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do concreto polimérico à base de quartzo.

<b>Propriedades</b>	
Resistência à compressão	124 N/mm <sup>2</sup>
Densidade	2,2 kg/dm <sup>3</sup>
Resistência à tração na flexão	32,4 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	31 kN/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,25
Limites de temperatura	-29 °C a 93 °C
Resistência à tração pura	13,1 N/mm <sup>2</sup>
Absorção de água	0,01%
expansão térmica	14,2 x 10 <sup>-6</sup> m/m °C
Resistência química	Excelente
Índice propagação de chamas	Class A (Class I) – 25 ou sob propagação de chamas conforme ASTM E84

Fonte: Adaptado de <https://www.basetek.com/zanite-plus-polymer-composite>, acesso em 17/05/2020.

Na Universidade Nacional de Singapura, o Professor Rahman e seus colaboradores também desenvolveram diferentes materiais em substituição aos tradicionais. Rahman et al. (2001) compararam as propriedades de diferentes materiais, indicados na Tabela 2, e constataram que: (a) para o concreto celular, ao aumentar a densidade do material ocorre crescimento das resistências à compressão e à tração e do módulo de elasticidade. E, o inverso ocorre com o amortecimento, ou seja, o amortecimento melhorou com a diminuição da densidade; (b) para o concreto normal, após sua impregnação com o polímero metacrilato de metilo (MMA), houve um crescimento das resistências à compressão e à tração, do módulo de elasticidade e do amortecimento; (c) para o concreto celular de baixa densidade, após receber maior carga de polímeros, suas propriedades foram elevadas.

Tabela 2: Características de diferentes materiais.

Materiais		Densidade úmida (kg/m <sup>3</sup> )	Frequência (Hz) Modo 1	Fator de amortecimento Modo 1 (%)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Concreto normal	N21	2100	1490	0,151	56,2	7,8	21,7
Concreto celular	C18	1800	1100	0,274	11,6	4,1	9,6
	C15	-	990	0,267	7,8	2,9	6,4
	C12	-	710	0,678	1,7	1,0	3,1
Concreto normal impregnado com polímero	PN21	2100	1480	0,167	86,9	16,3	28,6
Concreto celular impregnado com polímero	PC18	1800	1380	0,389	57,4	19,2	11,3
	PC15	1500	1190	0,792	47,5	17,1	8,9
	PC12	1200	1040	1,102	28,2	11,5	5,9
Aço		-	1890	0,026	-	-	-

Fonte: Adaptado de Rahman et al. (2001).

Os autores concluíram que o concreto celular impregnado com polímero apresentou taxas de amortecimento mais altas em frequências mais baixas (em torno de 250 a 650 Hz) e apresentou maior rigidez, mantendo a eficiência do sistema.

Ducatti; Santos; Lintz (2006) desenvolveram doze protótipos de base de torno em escala real, com os seguintes materiais: argamassa polimérica, argamassa polimérica armada, ferro fundido, aço fundido, argamassa armada, argamassa com 1% fibras de aço, argamassa com 2% fibras de aço e argamassa com 3% fibras de aço. Com relação aos ensaios dinâmicos, foram identificados os 6 primeiros modos deformáveis para os barramentos analisados. Na Tabela 3 mostram-se os resultados numéricos das frequências naturais e dos fatores de amortecimento modais identificados, respectivamente.



Tabela 3: Amortecimentos modais identificados.

Modos	Fator de amortecimento modal [%]							
	aço	ferro fundido	argamassa					
			com 1% fibras	com 2% fibras	com 3% fibras	armada	polimérica	polimérica armada
1º Flexão Horizontal	0,344	0,458	0,706	0,457	0,517	0,586	0,526	0,511
1º Flexão Vertical	0,216	2,239	1,568	0,714	0,376	1,997	0,526	2,9
1º Torção	0,936	0,767	1,237	0,64	2,43	0,788	0,793	0,641
2º Torção	0,687	N/I*	0,203	0,487	0,461	0,365	1,134	0,518
2º Flexão Horizontal	0,14	0,583	0,775	0,502	1,377	0,426	0,848	0,778
2º Flexão Vertical	0,751	0,183	1,189	0,733	0,653	0,778	0,717	0,642

\* Não Identificado

Fonte: Ducatti; Santos; Lintz (2006).

Observa-se a predominância do modelo de argamassa com 1% fibras, como o que apresenta a maior contribuição quanto ao fator de amortecimento, seguido pelos modelos: argamassa polimérica, argamassa armada, argamassa polimérica armada, argamassa com 3% fibras, argamassa com 2% fibras, ferro fundido e aço fundido.

Nas Tabelas 4 e 5 estão indicadas algumas propriedades mecânicas de diferentes materiais empregados na fabricação de estruturas de máquinas-ferramenta. Vale destacar, que o amortecimento de uma estrutura engloba o valor do amortecimento do material puro e o valor do amortecimento das ligações estruturais. Entretanto, com a elevação da tensão, o amortecimento diminui rapidamente, devido à abertura das fissuras, e tende a estabilizar com um valor menor que o inicial, devido somente ao amortecimento viscoso (MAHENDRAKUMAR; SYATHABUTHAKEER; MOHANRAM, 2014; SARTORTI, 2015).

Tabela 4: Propriedades mecânicas dos materiais empregados em estruturas de máquinas-ferramenta.

Propriedades	Ferro fundido	Concreto de cimento	Concreto polimérico	Granito epóxi
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7150	2300	2260	2850
Resistência à compressão (MPa)	600	20-40	70-130	65-150
Módulo elasticidade (GPa)	80 - 120	20-30	30-40	60-80
Fator de amortecimento	0,001	0,001	0,001	0,01

Fonte: Mahendrakumar; Syathabuthakeer; Mohanram (2014).

Tabela 5: Fator de amortecimento viscoso equivalente para diferentes materiais.

<b>Material</b>	<b>Fator de amortecimento</b>
Concreto armado não fissurado	0,007 - 0,010
Concreto armado com fissuração completa, porém com baixo nível de tensão	0,010 - 0,040
Concreto armado com fissuração completa, alto nível de tensão, porém sem escoamento do aço	0,005 - 0,008
Concreto protendido não fissurado	0,004 - 0,007
Concreto protendido levemente fissurado (protensão limitada e parcial)	0,008 - 0,012
Compósitos	0,002 - 0,003
Aço	0,001 - 0,002

Fonte: Bachmann et al. (1997).

Na Tabela 6 estão apresentadas algumas propriedades para o concreto de cimento, utilizado na fabricação de bases de máquinas-ferramenta, obtidas pelos pesquisadores Shmidt e Degtyareva (2017).

Tabela 6: Algumas propriedades do concreto empregado na fabricação de base de máquinas.

	Composição 1	Composição 2
Consumo de cimento (kg)	500	550
Areia (kg)	630	570
Brita (kg)	1050	1020
Água (L)	170	197,5
Resistência à compressão (MPa)	81,65	83,11
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )	2485	2427
Resistência à tração (MPa)	6,96	6,21
Módulo de elasticidade (GPa)	42,91	42,48
Coefficiente de Poisson	0,21	0,20

Fonte: Adaptado de Shmidt e Degtyareva (2017).

## 2.2 Concreto autoadensável (CAA)

O CAA é definido pela ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b) como o concreto capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

O CAA é um concreto especial que foi introduzido pela primeira vez por Okamura em 1986 (OKAMURA, 1997), como um concreto capaz de preencher a fôrma, se auto adensar apenas sobre o efeito da gravidade, sem qualquer vibração externa.

Em fevereiro de 2002, a EFNARC, representando produtores e aplicadores de produtos de construção especializados para concreto, publicou diretrizes para ensaios que medem as propriedades do CAA no estado fresco. O CAA é um tipo de concreto considerado o material mais revolucionário das últimas décadas. Originalmente, foi desenvolvido para compensar uma crescente escassez de mão-de-obra qualificada e apresenta diversos benefícios:

- Possibilita construção mais rápida;
- Reduz a necessidade de mão de obra local;
- Proporciona melhor acabamento de superfície e maior liberdade no projeto;
- Facilidade na aplicação do material;
- Proporciona maior durabilidade;
- Preenche seções de concreto mais finas;
- Apresenta níveis de ruído reduzidos e ausência de vibração; e
- Contribui para um ambiente de trabalho mais seguro.

Em maio de 2005, a EFNARC publicou novas especificações que definem o CAA e muitos dos termos técnicos usados para descrever as suas propriedades e uso. A EFNARC também fornece informações sobre os padrões relacionados aos ensaios e aos materiais constituintes associados utilizados na produção de CAA. No Brasil são utilizadas as especificações da ABNT para ensaios e classificação do CAA, tais como: ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b), ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c), ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017d), ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e), ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f), ABNT NBR 15823-6 (ABNT, 2017g).

As características do CAA no estado fresco que o diferem do concreto convencional são (EFNARC, 2005; GOMES e BARROS, 2009):

- Habilidade de preenchimento: capacidade de o CAA preencher completamente as fôrmas e armaduras, sem vibração, mantendo-se homogêneo;
- Habilidade de passar por restrições: passar através de obstáculos, como fôrmas e armaduras, sem apresentar bloqueio de partículas de agregados; e
- Capacidade de resistir à segregação: manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e o lançamento, sem que haja segregação ou exsudação no concreto colocado na fôrma.

## 2.2.1 Materiais constituintes do CAA

Os materiais constituintes empregados na produção do CAA são os mesmos que os utilizados para concreto convencional. Porém, acrescentados teores maiores de finos e aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade.

Segundo a ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b) os materiais empregados na produção do CAA devem atender à especificação da ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015c).

### 2.2.1.1 Cimento

Todos os cimentos que estão em conformidade com as normas podem ser utilizados para a produção de CAA.

Os cimentos de maior finura são mais adequados para a produção do CAA, uma vez que a viscosidade e a tensão de escoamento dependem das características reológicas da pasta que compõe o concreto (EFNARC, 2005; REPETTE, 2011).

Su; Hsu; Chai (2001) recomendam que seja utilizado no mínimo 270 a 290 kg/m<sup>3</sup> de cimento para garantir estruturas com alta durabilidade, sendo que o uso excessivo de cimento causa retração do concreto.

Segundo a EFNARC (2002) cimentos contendo mais de 10% de C<sub>3</sub>A podem causar problemas de baixa trabalhabilidade. Teores usuais de cimento estão na faixa entre 350 kg/m<sup>3</sup> a 450 kg/m<sup>3</sup>. Quantidade maior que 500 kg/m<sup>3</sup> pode ser perigoso e aumentar a retração. O uso de menos de 350 kg/m<sup>3</sup> somente poderá ser adequado com a inclusão de outro material, tais como cinza volante, pozolanas, etc.

Segundo Repette (2011) para a produção do CAA o teor de cimento está dentro de 350 a 450 kg/m<sup>3</sup>, a quantidade de partículas finas entre 150 e 250 kg/m<sup>3</sup>, a relação água/finos (em volume) entre 0,8 e 1,10 (partículas menores que 0,075 mm), volume agregado miúdo na fração da argamassa entre 35% e 50% e volume agregado graúdo na fração do concreto entre 25% e 35%.

### 2.2.1.2 Adições

As adições inertes e pozolânicas/hidráulicas são comumente usadas para melhorar e manter a resistência de coesão e segregação do CAA no estado fresco. A adição também

interfere no teor de cimento, a fim de reduzir o calor de hidratação e a retração térmica. As adições minerais ideais são aquelas menores que 0,125 mm e, em geral, é desejável que mais de 70% do material passe pela peneira de 0,063 mm (EFNARC, 2005).

Segundo Repette (2011) as adições são empregadas no CAA com o objetivo de aumentar a quantidade de finos (partículas menores que 0,150 mm) nas misturas. São indicadas que mais de 75% dos finos tenha dimensão menor que 0,075 mm.

A EFNARC (2005) classifica as adições minerais de acordo com a sua capacidade reativa com a água em:

- Tipo I – Inertes ou semi-inertes (fíler mineral e pigmentos); e
- Tipo II – Pozolânicas e hidráulicas (escória de alto-forno).

As adições inertes provocam uma ação física e contribuem para uma maior compacidade da pasta do CAA, como por exemplo: fíler calcário, quartzo, resíduos do beneficiamento de mármore e granito (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016; ALYOUSEF et al., 2018; BOUKHELKHAL et al., 2016; HAMEED et al., 2016).

O material pozolânico segundo a ABNT NBR 12653 (ABNT, 2015b) consiste em um material que reage quimicamente com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  liberado na hidratação do cimento Portland a temperatura ambiente e forma compostos sólidos na fase pasta de cimento. Exemplos de materiais pozolânicos: cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz.

### **2.2.1.3 Água**

A água deve estar em conformidade com a ABNT NBR 15900-1 (ABNT, 2009f).

### **2.2.1.4 Agregados**

Segundo a EFNARC (2005) partículas de agregados menores que 0,125 mm são consideradas pó e são importantes para a reologia do CAA.

O teor de umidade, a absorção de água, a classificação e as variações no teor de finos de todos os agregados devem ser continuamente monitorados, e devem ser levados em consideração para produzir CAA de qualidade constante.

A forma e a distribuição do tamanho das partículas do agregado é muito importante e afeta o empacotamento e vazios. Alguns métodos de dosagem utilizam o teor de vazios do agregado para prever o volume de pasta e de argamassa necessários para dosar o CAA.

#### **2.2.1.4.1 Agregado graúdo**

O dimensão máxima do agregado geralmente deve ser limitado a 12 a 20 mm, embora também possa ser empregado tamanhos maiores (EFNARC, 2005).

Segundo Repette (2011) são indicadas dimensões máxima característica para o agregado graúdo de 9,5 mm a 19 mm, de forma regular.

A distribuição granulométrica e a forma do agregado graúdo influenciam diretamente no fluxo e na capacidade de passagem entre obstáculos do CAA e teor de pasta. Quanto mais esféricas as partículas de agregados, menor o bloqueio e maior o fluxo devido à redução do atrito interno.

Segundo Gomes e Barros (2009) o volume de agregado graúdo no CAA deve estar entre 28% e 35% do volume do concreto com proporções de 750 kg/m<sup>3</sup> a 920 kg/m<sup>3</sup>.

#### **2.2.1.4.2 Agregado miúdo**

A influência de agregados finos nas propriedades no estado fresco do CAA é significativamente maior que a do agregado graúdo. As frações de partículas menores que 0,125 mm devem incluir o teor de finos da pasta e também devem ser consideradas no cálculo da relação água/finos. O alto volume de pasta nas misturas de CAA ajuda a reduzir o atrito interno entre as partículas de areia. Muitos métodos de dosagem do CAA usam areias misturadas para otimizar a curva granulométrica e isso também pode ajudar a reduzir o teor de pasta (EFNARC, 2005).

Segundo Repette (2011) as areias naturais são preferíveis por apresentarem grãos com forma mais uniforme e arredondada. As areias artificiais apresentam elevada angulosidade e aspereza superficial, causando maior intertravamento das partículas e maior adsorção de água, aumentando a demanda por pasta e aditivos superplastificantes na composição do CAA. São preferíveis areias de módulo de finura (MF) de 2,4 para areias tidas como médias e 1,0 para areias finas.

Segundo Repette (2011) o volume de agregado miúdo na fração da argamassa varia entre 35% e 50%. Segundo Gomes e Barros (2009) o volume de agregado miúdo no CAA deve variar entre 40% e 50% do volume de argamassa, com proporções de 710 kg/m<sup>3</sup> a 900 kg/m<sup>3</sup>.

### **2.2.1.5 Aditivos**

Os aditivos superplastificantes e os aditivos modificadores de viscosidade são os mais utilizados na mistura do CAA. Os superplastificantes contribuem para aumentar a fluidez das misturas de CAA e os aditivos modificadores de viscosidade reduzem a segregação e a sensibilidade da mistura devido a variações em outros constituintes, especialmente quanto ao teor de umidade.

#### **2.2.1.5.1 Superplastificantes**

Segundo Repette (2011) os mais empregados para CAA são os superplastificantes a base de policarboxilato. Estes aditivos reduzem no mínimo, 20% da água da mistura. Este tipo de superplastificante promove a dispersão das partículas por meio do efeito esférico, sem causar a diminuição expressiva da viscosidade da pasta, desejável quanto a resistência à segregação da mistura. Ressalta-se, entretanto, que a tensão de escoamento da pasta é o fator que mais influência a segregação do CAA.

A mistura deve proporcionar a fluidez necessária e manter seu efeito de dispersão durante o tempo necessário para o transporte e a aplicação do CAA. O concreto pré-moldado exige um tempo de retenção menor do que o concreto que precisa ser transportado e colocado no local (EFNARC, 2005).

#### **2.2.1.5.2 Aditivos modificadores de viscosidade**

Segundo a EFNARC (2005) os aditivos modificadores de viscosidade contribuem para a coesão do CAA sem alterar significativamente sua fluidez.

Segundo Repette (2011) os modificadores de viscosidade são aditivos empregados no CAA para suprir a falta de finos da mistura, corrigir a forma e composição granulométrica variáveis dos constituintes da mistura e a inconstância na quantidade de água do CAA. Os modificadores de viscosidade diminuem a exsudação e aumentam a viscosidade da pasta, evitando a segregação do CAA.

### **2.2.1.6 Fibras**

Segundo a EFNARC (2005) as fibras metálicas e poliméricas têm sido usadas na produção de CAA, mas podem reduzir a fluidez e a capacidade de passagem entre obstáculos. São, portanto, necessários testes para estabelecer o tipo, comprimento e quantidade ideais para fornecer todas as propriedades necessárias ao concreto fresco e endurecido.

As fibras de polímero podem ser usadas para melhorar a estabilidade do CAA, pois ajudam a evitar o assentamento e fissuras devido à retração plástica do concreto.

Fibras estruturais de aço ou de polímero são usadas para modificar a ductilidade/tenacidade do concreto endurecido. Seu comprimento e quantidade são selecionados dependendo da dimensão máxima do agregado e dos requisitos estruturais. O uso de CAA com fibras em estruturas com reforço normal aumenta significativamente o risco de bloqueio na passagem por restrições.

### **2.2.2 Propriedades do CAA no estado fresco**

O concreto para ser classificado como autoadensável deve atender aos requisitos fundamentais: fluidez, habilidade de preenchimento, capacidade de passar entre obstáculos e resistência à segregação (NEVILLE e BROOKS, 2013; GOMES e BARROS 2009). O CAA é coeso o suficiente para ser manuseado sem segregação e exsudação (ASLANI, 2014).

A habilidade de preenchimento está associada a capacidade do CAA de fluir e preencher todos os espaços da fôrma pelo seu peso próprio. Esta propriedade é regida pela alta fluidez e coesão da mistura, alcançadas pelo uso de adições minerais, aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade.

A capacidade do CAA de passar entre os obstáculos como armaduras, seções e aberturas estreitas, sem que haja obstrução do fluxo, se deve à viscosidade da pasta e da argamassa e às características dos agregados.

A resistência à segregação do CAA impede a separação dos agregados e demais componentes da mistura, sendo governada pela viscosidade e coesão da mistura.

No Brasil, os métodos de ensaio sobre CAA foram publicados inicialmente em 2010 pela ABNT, e, em 2017 a norma foi revisada sendo composta pela parte 1 que estabelece a classificação, controle e recebimento no estado fresco do CAA e parte 2 que especifica os ensaios no estado fresco do CAA.



Os ensaios relacionados ao estado fresco do CAA realizados nesta pesquisa estão descritos a seguir.

### **2.2.2.1 Ensaio de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual**

Este ensaio avalia a fluidez do CAA, em fluxo livre, sob a ação de seu próprio peso, pela determinação do espalhamento e do tempo de escoamento, empregando-se o cone de Abrams ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c).

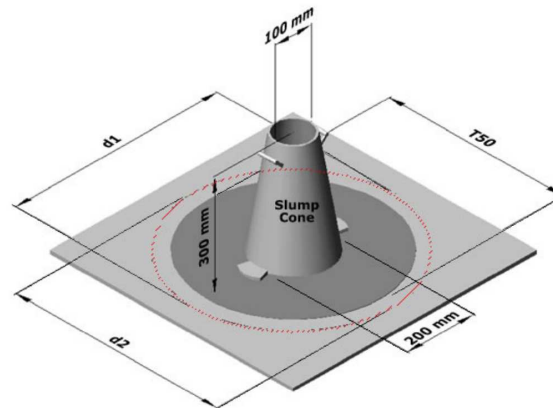
Na realização deste ensaio, o cone é colocado sobre uma placa-base com marcação de 200 mm e 500 mm, centrando-o na marcação circular de 200 mm, como mostrado na Figura 1, segundo Cavalcanti (2006). Após a mistura do CAA, dentro de 2 minutos, o CAA é despejado no cone, a uma altura de no máximo 125 mm acima do topo do molde, que é fixado pelas suas alças e pelas mãos de um operador. Ao fim da operação de preenchimento o cone é levantado pelas suas alças, na direção vertical, em um tempo até 4 s. O cronômetro é acionado e quando o CAA atinge o diâmetro 500mm da placa-base é registrado o tempo  $t_{500}$  em segundos. Em seguida, após o repouso completo do material faz-se duas medidas perpendiculares do espalhamento do concreto em mm.

Neste mesmo ensaio determina-se o índice de estabilidade visual (IEV) do material visualmente e classifica-se o concreto em 4 classes:

- IEV 0 (altamente estável);
- IEV 1 (estável);
- IEV 2 (instável); e
- IEV 3 (altamente instável).

Segundo Repette (2011) o acúmulo de agregado graúdo no centro da porção de concreto indica propensão do material a segregação e ao bloqueio na passagem por restrições.

Figura 1: Conjunto placa-base e cone de Abrams.



Fonte: Cavalcanti (2006).

### 2.2.2.2 Habilidade passante pelo método do anel J

Este ensaio determina a habilidade passante do CAA, em fluxo livre, pelo anel J conforme ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017d). Pode-se avaliar a capacidade do CAA escoar e passar por restrições (REPETTE, 2011).

O ensaio é realizado da seguinte maneira: coloca-se o cone na marca 200 mm sobre a placa-base e centraliza o anel J sobre esta, como mostrado na Figura 2. O CAA é despejado no cone, a uma altura de no máximo 125 mm acima do topo do molde, que é fixado pelas suas alças e pelas mãos de um operador. Ao fim da operação de preenchimento, o cone é levantado pelas suas alças, na direção vertical; deve-se aguardar o concreto alcançar a situação de aparente repouso e em seguida são realizadas duas medidas perpendiculares entre si do diâmetro de espalhamento do concreto em mm. O resultado do ensaio é a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido no ensaio segundo a ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c) e o obtido neste ensaio.

Figura 2: Conjunto placa-base e anel J.



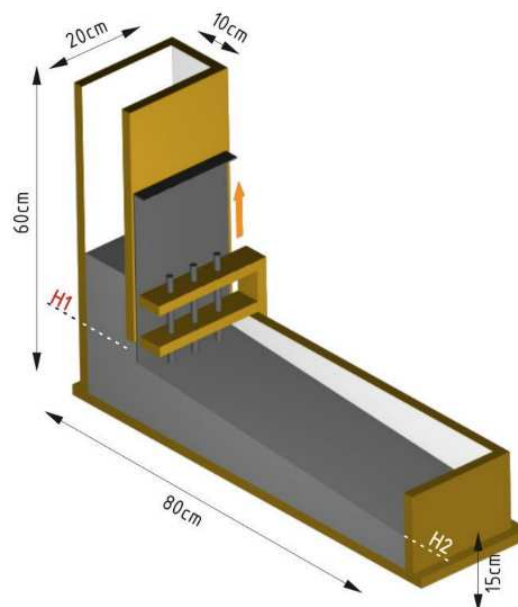
Fonte: Próprio autor.

### 2.2.2.3 Habilidade passante pelo método da caixa L

Este ensaio mede a habilidade passante, sob fluxo confinado do CAA por meio da caixa L conforme ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e). Segundo Repette (2011) neste ensaio é avaliada a capacidade do CAA de escoar e de resistir ao bloqueio ao passar pelas armaduras da caixa L.

O ensaio consiste em preencher com concreto a caixa L com comporta fechada, como mostrado na Figura 3 (ALENCAR, 2008). Após o preenchimento da câmara vertical da caixa L, abre-se a comporta permitindo o escoamento do concreto na câmara horizontal e mede-se as alturas H2 e H1 (alturas referentes a superfície do concreto, medida a partir do fundo da caixa, nas extremidades posterior e anterior da câmara horizontal, respectivamente). O resultado do ensaio é a razão entre as alturas H2 e H1 em mm.

Figura 3: Caixa L - ensaio especificado na ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e).



Fonte: Alencar (2008).

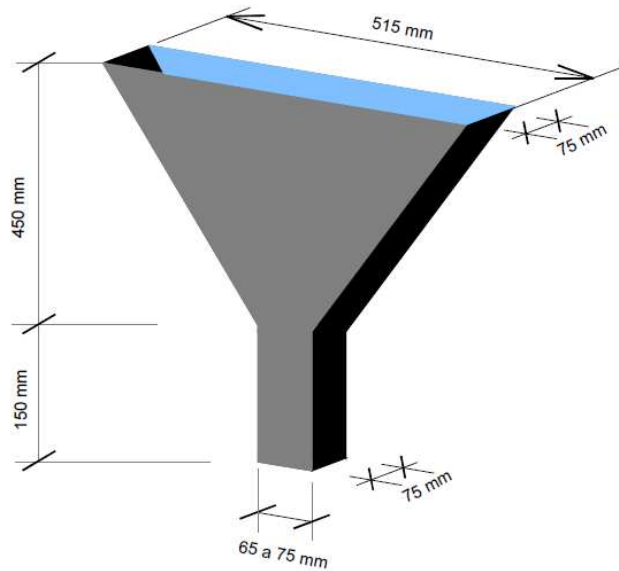
### 2.2.2.4 Viscosidade pelo método do funil V

Este ensaio determina a viscosidade do CAA pela medida do tempo de escoamento do material pelo funil V, conforme ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f). Segundo Repette (2011) este ensaio avalia a capacidade do concreto de escoar e de passar por estreitamentos.

Na Figura 4 o funil V é preenchido totalmente com o concreto mantendo a comporta do equipamento fechada (ALENCAR, 2008). Após 10 segundos do preenchimento do funil a

comporta é aberta e o cronômetro é acionado registrando o tempo, em segundos, do escoamento total do material.

Figura 4: Funil V empregado no ensaio especificado na ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f).



Fonte: Adaptado de Alencar (2008).

Na Tabela 7 estão os limites especificados pela norma brasileira ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b) que classifica o concreto como autoadensável.

Tabela 7: Propriedades no estado fresco do CAA.

<b>Classes de espalhamento (slump-flow)</b>		
Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	
<b>Classes de viscosidade plástica aparente <math>t_{500}</math></b>		
Classe	$t_{500}$ (s)	Método de ensaio
VS 1	$\leq 2$	ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)
VS 2	$> 2$	
<b>Classes de índice de estabilidade visual</b>		
Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0	sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)
IEV 1	sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
IEV 3	segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa $> 10$ mm)	
<b>Classes de habilidade passante pelo anel J</b>		
Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017d)
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	
<b>Classes de habilidade passante pela caixa L</b>		
Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e)
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço	
<b>Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V</b>		
Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF 1	$\leq 8$	ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f)
VF 2	9 a 25	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).

Na Tabela 8 apresentam-se as propriedades que devem ser medidas como exigência mínima para garantir os requisitos de recebimento do CAA no estado fresco.

Tabela 8: Propriedades no estado fresco do CAA segundo a ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).

<b>Especificações brasileiras</b>	<b>Propriedades medidas</b>	<b>Ensaios</b>
ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)	fluidez	Espalhamento
	viscosidade plástica aparente	t <sub>500</sub>
	estabilidade visual	índice de estabilidade visual
ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017c)	habilidade passante	Anel J

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).

Segundo a ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b), caso sejam realizados os ensaios para medida da habilidade passante pela caixa L e/ou viscosidade plástica aparente pelo funil V, pode ser dispensada a realização do ensaio para medida da habilidade passante pelo anel J e/ou viscosidade plástica aparente t<sub>500</sub>.

## 2.2.3 Principais propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido

### 2.2.3.1 Resistência à compressão

A resistência do concreto é influenciada por uma série de fatores, tais como: porosidade, relação água/cimento, grau de adensamento, idade, temperatura, relação agregado/cimento, qualidade do agregado (granulometria, textura superficial, forma, resistência e rigidez), dimensão máxima do agregado e a zona de transição (NEVILLE e BROOKS, 2013). A resistência à compressão do CAA é ligeiramente maior que do concreto vibrado convencional, devido a uma melhor interface entre o agregado e a pasta endurecida (EFNARC, 2005). Segundo Repette (2011) a resistência à compressão do CAA geralmente tende a ser maior que 30 MPa. O CAA possui maior homogeneidade na região entre pasta de cimento e agregados devido a maior dispersão das partículas de cimento pela ação dos superplastificantes. Devido ao alto teor de pó, a microestrutura do CAA é muito compacta e densa, o que resulta em alta resistência mecânica (NAJIM e HALL, 2012). No Brasil a resistência à compressão é determinada pela ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018a).

### 2.2.3.2 Resistência à tração

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a resistência à compressão e à tração do concreto estão relacionadas; embora, não exista uma proporcionalidade direta. Quanto maior a resistência à compressão menor a relação tração/compressão.

O CAA exige uma formulação de materiais que atribua a ele alta fluidez e estabilidade, como altos volumes de pó e proporções relativamente baixas de água/pó com quantidades significativas de superplastificantes. O pó geralmente consiste em uma combinação de cimento Portland com pó de calcário, cinzas volantes, escória granulada do alto-forno, sílica ativa e outros. Assim, a resistência do CAA tende a ser governada tanto pelo tipo e proporção de pó quanto pela relação água/pó (DOMONE, 2007).

A resistência à tração do CAA pode ser assumida como sendo a mesma para um concreto convencional, pois o volume de pasta (cimento+finos+água) não tem efeito significativo na resistência à tração (EFNARC, 2005). Segundo Domone (2007) a relação entre a resistência à tração e à compressão do CAA é semelhante a do concreto convencional.

No Brasil a resistência à tração é determinada pela ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011) medida por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos ou pela ABNT NBR 12142 (ABNT, 2010) medida por flexão de corpos de prova prismáticos.

### **2.2.3.3 Retração e fluência**

A retração do concreto pode ser autógena e por secagem. A retração autógena é causada pelo consumo interno de água durante o processo de hidratação dos compostos do cimento. O volume dos produtos hidratados do cimento é menor que o volume dos produtos não hidratados e a água. Assim, ocorre uma redução de volume da pasta causando tensões de tração, resultando em retração autógena (NEVILLE e BROOKS, 2013; EFNARC, 2005).

A retração plástica ou por secagem é causada pela perda de água da pasta de cimento por evaporação. A retração plástica é maior quanto maior o consumo de cimento da mistura ou menor quanto maior o volume e o módulo de elasticidade do agregado (NEVILLE e BROOKS, 2013; EFNARC, 2005).

A fluência é definida como o aumento gradual da deformação ao longo do tempo, sob uma tensão mantida constante, considerada após terem ocorridas outras deformações como retração, expansão e deformação térmica (NEVILLE e BROOKS, 2013). A fluência ocorre na pasta endurecida de cimento e é influenciada por sua porosidade, que está relacionada à sua relação água/cimento. Durante a hidratação, a porosidade da pasta de cimento reduz e, para um determinado concreto, a fluência diminui à medida que a resistência aumenta. O tipo de cimento influencia a fluência, sendo que os cimentos que hidratam mais rapidamente terão maior resistência para certa idade, menor relação tensão/resistência e menor fluência (NEVILLE e BROOKS, 2013; EFNARC, 2005).

No concreto convencional o agregado é mais rígido que a pasta, restringindo a fluência da pasta de cimento. Assim quanto maior o volume do agregado e quanto maior o valor do módulo de elasticidade do agregado, menor a fluência (NEVILLE e BROOKS, 2013; EFNARC, 2005). O CAA tem como característica possuir alto volume de pasta; portanto, espera-se que a retração e a fluência para o CAA possuam valores um pouco maiores que para o concreto convencional de mesma resistência (EFNARC, 2005; AN; JIN; SHI, 2005). Alguns pesquisadores tem substituído parte do cimento por cinzas volantes em CAA e tem observado redução da retração (KRISTIAWAN e ADITYA, 2015; GUNEYISI; GESOGLU; OZBAY, 2010) e fluência (HUYNH; HWANG; LIMONGAN, 2018; BOCCIARELLI et al., 2018).

#### **2.2.3.4 Resistência à flexão**

A resistência à flexão de vigas de CAA depende principalmente da relação água/cimento, material cimentício suplementar, dimensão e volume de agregado graúdo e da qualidade da interface entre os agregados e a pasta de cimento.

O aumento da quantidade de agregado graúdo parece resultar em uma redução da resistência à flexão para uma dada dimensão de agregado. Isso pode ser explicado pela zona de transição, região ao redor do agregado, que é mais fraca em comparação a argamassa ou ao agregado (KAMAL; SCHUTTER, 2014).

Kefelegn e Gebre (2020) verificaram que vigas de CAA possuem maior capacidade de manutenção de carga e são mais dúcteis ao serem comparadas com o concreto convencional.

#### **2.2.3.5 Tenacidade**

Segundo Domone (2007) ensaios de tenacidade à fratura em concreto convencional mostram que o CAA possui tenacidade semelhante ou inferior ao concreto convencional, mas em ensaios em elementos de concreto armado indicam maior ductilidade, principalmente em colunas.

#### **2.2.3.6 Resistência à aderência da armadura**

O concreto armado é baseado em uma ligação eficaz entre o concreto e a armadura. A fluidez e coesão do CAA facilitam o envolvimento das barras de aço garantindo a transferência adequada de tensões entre aço e concreto.

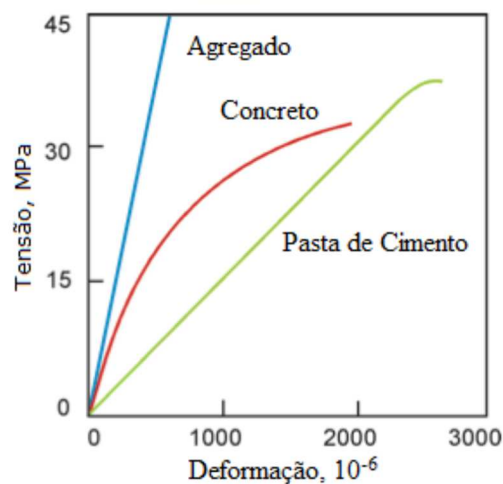
Sabau; Pop; Onet (2016) observaram que o CAA apresentou melhor comportamento de união entre aço-concreto que o concreto convencional.



### 2.2.3.7 Módulo de elasticidade estático

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) as propriedades elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. O módulo de elasticidade de um material é a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional assumido. Na Figura 5 observa-se que o concreto não apresenta comportamento elástico linear como a pasta de cimento e o agregado apresentam.

Figura 5: Comportamentos típicos das curvas tensão-deformação para o concreto e seus principais constituintes.

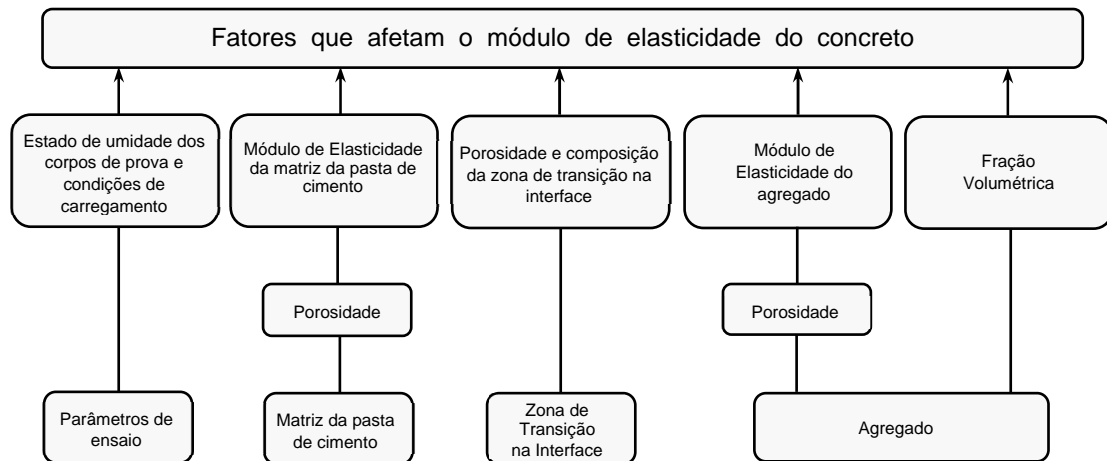


Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Em materiais heterogêneos, como o concreto, o comportamento elástico do composto depende de vários fatores, tais como: massa específica, fração volumétrica e módulo de deformação dos componentes e características da zona de transição. Na Figura 6 estão indicados os fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A zona de transição na interface também afeta o módulo elástico do concreto, pois concentra vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio (compostos fracos) que aumentam a porosidade dessa região. A porosidade do agregado graúdo também influencia no módulo de elasticidade do concreto, ou seja, a porosidade do agregado determina sua rigidez que, por sua vez, controla a capacidade do agregado em restringir as deformações da matriz (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 6: Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.

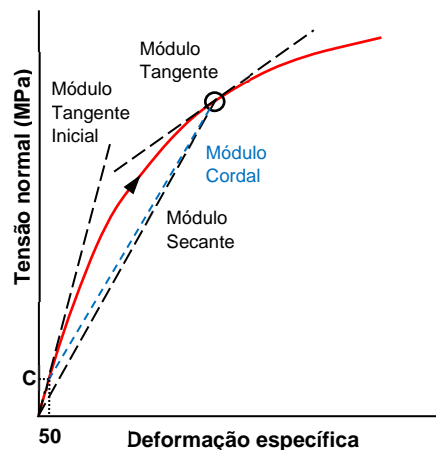


Fonte: Mehta e Monteiro, 2014.

O módulo de elasticidade estático do concreto é obtido pela declividade da curva tensão-deformação. Para o concreto esta curva é não-linear e existem três métodos utilizados para determinar os três tipos de módulo de elasticidade: tangente, secante e cordal.

O módulo tangente é dado pela declividade de uma reta traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto da curva. O módulo secante é dado pela declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura. O módulo cordal é obtido pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação. A linha é traçada de um ponto da deformação longitudinal de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  até o ponto correspondente a 40% da carga última (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). No gráfico tensão-deformação mostrado na Figura 7 estão ilustrados os três módulos tangente inicial, secante e cordal.

Figura 7: Definição dos módulos de elasticidade tangente inicial e secante.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Na Tabela 9 apresentam-se alguns métodos internacionais padronizados para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. No Brasil, a norma que regulamenta o ensaio de módulo de elasticidade estático é a ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017a) semelhante a ASTM C469 (ASTM, 2014). No ensaio de determinação do módulo estático do concreto verificam-se alguns aspectos negativos que resultam na ocorrência de grande variabilidade dos resultados, tais como (CANESSO et al., 2008):

- interferência do aparato utilizado para medir as deformações no ensaio, podendo ocorrer desprendimento do extensômetro devido a fissuras e vazios;
- imperfeições presentes na superfície cilíndrica do corpo de prova;
- falta de paralelismo no topo do corpo de prova, que pode influenciar negativamente a deformabilidade contribuindo para o aumento de imprecisão do ensaio; e
- o próprio equipamento de ensaio gera certos aspectos da curva tensão deformação que não se referem às propriedades intrínsecas do concreto.

Outros autores também verificaram variabilidades de resultados provenientes de ensaios estáticos, tais como Montija (2007), que obteve desvios padrões da ordem de 3,5 GPa e Bittencourt et al. (2014), que obtiveram desvios de 5,8 GPa a 6,3 GPa.

O CAA possui um teor de pasta maior que o concreto vibrado convencional, assim o valor do módulo de elasticidade tende a ser um pouco menor que do concreto convencional. Domone (2007) observou que o módulo elástico do CAA pode ser 40% menor que do concreto vibrado convencional com baixa resistência à compressão (20 MPa), mas a diferença se reduz a menos de 5% para concretos com resistência à compressão na faixa de (90–100 MPa). Segundo Repette (2011) o CAA com maior teor de agregado graúdo, com espalhamento entre 550 mm e 650 mm, podem apresentar módulo de elasticidade próximo ao concreto convencional.

Tabela 9: Equações para estimativa do módulo de elasticidade de concretos.

NORMA	Módulo Tangente	Módulo Secante	Observações
ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014)	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ para $f_{ck}$ 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$ para $f_{ck}$ de 55MPa a 90MPa	$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$ $E_{cs} = \left[ 0,8 + 0,2 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{80} \right) \right] \cdot E_{ci}$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse; $\alpha_E = 0,9$ para calcário; e $\alpha_E = 0,7$ para arenito.
ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017a)	$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3}$	$E_{cs} = \frac{\sigma_n - 0,5}{\varepsilon_n - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3}$	$\sigma_b = 0,3 f_{ck}$ ; 0,5 = tensão básica em MPa; $\varepsilon_b$ = deformação específica do concreto sob $\sigma_b$ ; $\varepsilon_a$ = deformação específica do concreto sob 0,5MPa.
fib MODEL CODE 2010	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$ $E_{ci}(t) = \left( e^{\left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}} \right)^{1/2} \cdot E_{ci}$	$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci}$ $E_c = \left[ 0,8 + 0,2 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{88} \right) \right] \cdot E_{ci}$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse; $\alpha_E = 0,9$ para calcário; e $\alpha_E = 0,7$ para arenito.
ACI 318 (ACI, 2014)	—	$E_c = 4700 \cdot (f_c)^{1/2}$	Para concretos de massa específica normal.
EUROCODE 2 2006	$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$	$E_{cm} = 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$	$f_{cm}$ em MPa.
DIN - 1045	$E_c = 6170 \cdot (f_c)^{1/2}$	—	Para concretos de massa específica normal.

Fonte: Próprio autor.

### 2.2.3.8 Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )

Examinando as vibrações de uma estrutura pode-se determinar as suas características dinâmicas e, por meio da análise modal experimental (que consiste em extrair as propriedades dinâmicas através de excitações por vibrações), caracterizar as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. As frequências naturais de vibração de uma estrutura são proporcionais aos seus módulos elásticos e a sua rigidez (MORRELL, 2006; ASTM E1876; ASTM, 2015).

O módulo de elasticidade dinâmico, é a relação entre tensão e deformação sob condições vibratórias, e é um parâmetro fundamental para a análise de estruturas de concreto sob condições dinâmicas, como cargas sísmicas. Ao contrário do módulo de elasticidade estático, o módulo dinâmico não pode ser determinado diretamente do teste de compressão de um cilindro padrão. Os métodos de frequência de ressonância e de velocidade de pulso

ultrassônico são duas técnicas de ensaios não destrutivos que têm sido amplamente utilizados para determinar o módulo dinâmico do concreto (LU et al., 2013).

A técnica de excitação por impulso (TEI) consiste na determinação das frequências naturais de vibração do corpo de prova de concreto, na condição livre-livre, através da excitação por um leve impacto mecânico. Esta excitação mecânica aplicada ao corpo de prova produz níveis de tensões muito pequenas durante a determinação destes parâmetros, portanto, não induz a formação de microtrincamento e o efeito de fluência. Por estas razões, pode-se considerar que o módulo dinâmico está associado unicamente a fenômenos elásticos do material e está mais próximo do módulo tangente inicial, que corresponde ao comportamento elástico do concreto obtido no início da curva tensão deformação (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Os valores dos módulos dinâmicos são habitualmente maiores aos módulos estáticos porque o período de tempo característico da vibração utilizada nos métodos dinâmicos é regularmente menor que 1 milissegundo (ms) o que impede a ocorrência de mecanismos anelásticos com o tempo de relaxação superior a 1 ms (PEREIRA et al., 2012).

As propriedades dinâmicas elásticas de um material podem ser obtidas quando se conhecem a geometria, massa e frequência de ressonância desse corpo de prova. A TEI pode ser aplicada para corpos de prova nos formatos de barras retangulares, cilindros e discos (ASTM C215; ASTM, 2014 e ASTM E1876; ASTM, 2015). Com a determinação do modo de vibração longitudinal ou flexional obtém-se os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal, flexional e o coeficiente de Poisson, instantaneamente (MORRELL, 2006).

As principais vantagens da utilização desta técnica são (ASTM E1876; ASTM, 2015):

- O ensaio é não-destrutivo e a amostra pode ser utilizada em ensaios posteriores e outros tipos de ensaios. A quantidade total de corpos de prova sob estudo é menor;
- Os resultados obtidos são mais precisos quando comparados aos ensaios estáticos pois o número de variáveis é menor e apresenta menos susceptibilidade aos erros experimentais (CANESSO et al. 2008; HAACH et al., 2013);
- A caracterização é realizada em poucos segundos e pode-se repetir o ensaio várias vezes para verificar os resultados;
- Pode ser utilizada para verificar o crescimento do módulo de elasticidade com o aumento da idade da amostra (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2009);
- Permite monitorar a variação do módulo de elasticidade de um mesmo corpo de prova em função da variação da temperatura e do número de ciclos térmicos conforme a norma ASTM C666 (ASTM, 2015); e

- Possibilita investigar os danos progressivos de elementos estruturais, uma vez que a fissuração diminui a rigidez do material, e, portanto, reduz a frequência natural de vibração (ALMEIDA e HANAI, 2008).

Na Tabela 10 estão algumas expressões empíricas que relacionam os módulos estático ( $E_c$ ) e dinâmico ( $E_d$ ).

Tabela 10: Expressões empíricas que relacionam os módulos estático ( $E_c$ ) e dinâmico ( $E_d$ ).

Expressões		Observações
Código Britânico BS 8110-2: 1985	$E_c = 1,25 \cdot E_d - 19$	Para concretos com teor de cimento inferior a 500 kg/m <sup>3</sup> ou para concretos com agregados de peso normal
Lyndon e Balendran (1986)	$E_c = 0,83 \cdot E_d$	-
Popovics (Popovics, 1975).	$E_c = \kappa \cdot E_d^{1,4} \cdot \rho^{-1}$	$\rho$ é a massa específica do concreto e $\kappa$ é uma constante que depende das unidades de medida ( $\kappa = 0,107$ quando o módulo é dado em Pa e $\rho$ em kg/m <sup>3</sup> ).

Fonte: Próprio autor.

### 2.2.3.9 Amortecimento

O amortecimento ou atrito interno em sistemas vibratórios ocorre através da dissipação da energia mecânica, em geral pela conversão gradativa em energia térmica ou sonora, que ocorre por atrito (SILVA, 2007). O amortecimento está diretamente associado com a microestrutura do material, presença de vazios, fissuras e microfissuras (DIETERLE e BANCHMANN, 1981; GRAFT-JOHNSTON; BAWA, 1969).

O amortecimento está intrinsecamente presente em um material ou sistema em vibração e pode ser classificado por meio de três tipos principais de mecanismos primários: amortecimento interno (do material), amortecimento estrutural (nas juntas e interfaces) e amortecimento fluídico (por meio de interações fluido-estrutura) (SILVA, 2007).

O amortecimento interno de materiais origina-se na dissipação de energia associada à microestrutura de defeitos, como limites de grãos e impurezas, e efeitos termoelásticos causados por gradientes de temperatura locais resultantes de tensões não uniformes. O amortecimento estrutural está associado a dissipação de energia mecânica causada pelo atrito devido ao movimento relativo entre componentes e por impacto ou contato intermitente nas juntas e uniões semi-rígidas de um dispositivo mecânico, sistema ou estrutura. O terceiro, o amortecimento fluídico está relacionado com a dissipação da energia mecânica em energia térmica devido à resistência ao movimento decorrente da força de arraste quando um material

ou componente mecânico se desloca em um meio fluido. É importante saber como a energia mecânica é dissipada e como ela está relacionada com a velocidade e amplitude de vibração (SILVA, 2007).

Nesse trabalho utilizou-se o amortecimento interno ou atrito interno (incorporado no software do equipamento Sonelastic® e especificado na norma ASTM E1876 (ASTM, 2015) como primordial e apropriado para caracterizar a dissipação da energia mecânica. O modelo adotado para representar esse tipo de amortecimento é o modelo viscoelástico equivalente. Este modelo pressupõe que a característica do amortecimento é viscosa e a força de atrito é diretamente proporcional à velocidade, conforme Equação 2.1 (SILVA, 2007).

$$F = -c\dot{z} \quad (2.1)$$

Considere um sistema linear com amortecimento viscoso com um grau de liberdade representado na Figura 8, sujeito a uma excitação externa  $F(t)$  (THORBY, 2008; RAO, 2008; RAO, 2011;). A Equação diferencial de movimento de segunda ordem que descreve este sistema é dada por:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F(t) \quad (2.2)$$

Sendo:

$m$  : massa que corresponde a inércia do sistema;

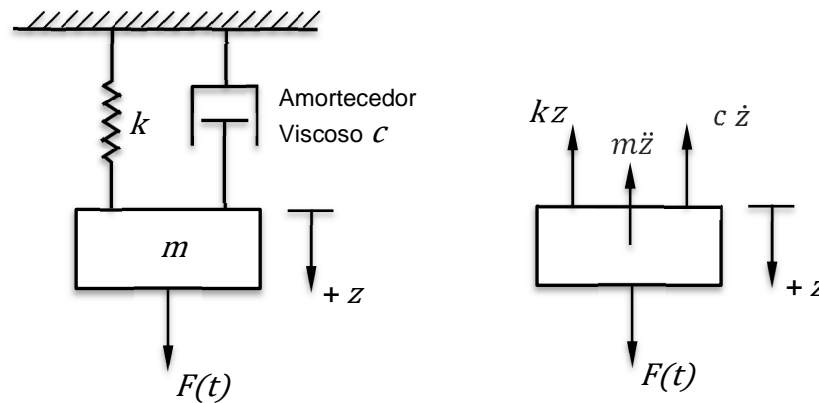
$c$  : constante de amortecimento viscoso proporcional à velocidade;

$k$  : constante de rigidez;

$z$  : posição da massa em um instante  $t$  qualquer, a partir da posição de equilíbrio estático;

$F(t)$  : Força aplicada em um instante  $t$ .

Figura 8: Sistema linear com um grau de liberdade e amortecimento viscoso.



a) Sistema massa, mola e amortecedor      b) Diagrama de corpo Livre (DCL)

Fonte: Adaptado de RAO (2008) e RAO (2011).

Referindo-se ao sistema linear mostrado na Figura 8, e representado pela Equação (2.2) se não houver força externa aplicada, isto é,  $F(t) = 0$  a Equação diferencial que descreve o movimento de corpo rígido deste sistema torna-se:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = 0 \quad (2.3)$$

Reescrevendo a Equação (2.3) por unidade de massa, tem-se:

$$\ddot{z} + \frac{c}{m}\dot{z} + \frac{k}{m}z = 0 \quad (2.4)$$

Definindo-se os termos:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad ; \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad ; \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{c_c} \quad (2.5)$$

$$\text{e} \quad c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (2.6)$$

onde  $\omega_n$  é a frequência natural de vibração,  $\zeta$  é o fator de amortecimento e  $c_c$  é o amortecimento crítico. Substituindo-se os parâmetros  $\zeta$  e  $\omega_n$  na Equação (2.4) tem-se:

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + \omega_n^2z = 0 \quad (2.7)$$



Para resolver a Equação diferencial homogênea de segunda ordem (2.7) pode-se obter uma solução assumindo que (RAO, 2008; RAO, 2011):

$$z = A_0 e^{st} \quad (2.8)$$

em que  $s$  é uma variável auxiliar e  $t$  é o tempo.

Substituindo  $z$  da Equação (2.8), onde  $A_0$  é a amplitude inicial de vibração, na Equação (2.7), obtém-se as duas soluções  $s_1$  e  $s_2$  :

$$s_{1,2} = \omega_n \left( -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) \quad (2.9)$$

O comportamento reproduzido pelo sistema em vibração livre depende da solução da Equação (2.9) e conseqüentemente do valor numérico da razão de amortecimento  $\zeta$ , conforme descrito a seguir:

- quando  $\zeta = 0$ : resulta num sistema não amortecido e apresenta duas raízes complexas;
- quando  $\zeta = 1$ : para esta condição o sistema é chamado de criticamente amortecido e as duas raízes são iguais e reais (não é oscilatório) ;
- quando  $\zeta > 1$ : nesta situação o comportamento do sistema é superamortecido e possui duas raízes reais e distintas (não apresenta oscilação);
- quando  $0 < \zeta < 1$ : para este caso o sistema é chamado de sub-amortecido e exibe duas raízes complexas. Este é o caso de maior interesse prático, uma vez que, a maioria das estruturas de engenharia apresentará um fator de amortecimento muito menor que o amortecimento crítico. Neste caso as raízes da Equação (2.9) podem ser reescritas como:

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm i \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.10)$$

ou ainda

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm i \omega_d \quad (2.11)$$

onde  $\omega_d$  é a frequência natural amortecida:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.12)$$

e o período de vibração amortecida  $T_d$ :

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} \quad (2.13)$$

A solução geral para a Equação (2.4) para o caso sub-amortecido,  $0 < \zeta < 1$ , pode ser descrita como (RAO, 2008; RAO, 2011):

$$z(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \cos(\omega_d t - \varphi_0) \quad (2.14)$$

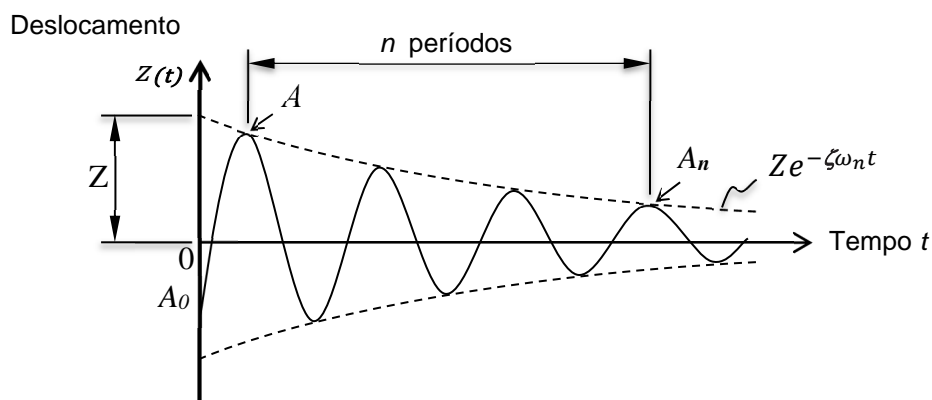
onde  $\varphi_0$  é o ângulo de fase inicial de vibração.

Existem vários métodos para determinar as características do amortecimento interno de um material, porém os dois mais utilizados são o decremento logarítmico e a largura de banda de meia potência (PUSKAR, 2001; GADE et al., 2002). A faixa de amortecimento e a frequência de vibração são determinantes para a escolha do método a ser aplicado. Nesta pesquisa, utilizou-se o método do decremento logarítmico para a determinação do amortecimento que é compatível com a TEI.

Neste método, o amortecimento é determinado a partir da resposta acústica transitória e da atenuação desta resposta no domínio do tempo produzida por uma excitação por impulso, aplicada ao sistema (material ou estrutura) em vibração livre.

Quando um sistema em vibração de um grau de liberdade com amortecimento viscoso (Figura 8 e Equação (2.7)) (SILVA, 2007) é excitado no instante  $t = 0$  por um impulso sua resposta assume a forma de uma redução exponencial da amplitude no tempo, até atingir a condição de repouso novamente, como apresentada na Figura 9.

Figura 9: Resposta ao impulso de um sistema amortecido com um grau de liberdade, Figura 8,  $0 < \zeta < 1$ , no instante  $t = 0$ .



Fonte: Adaptado de RAO (2011).

O parâmetro que representa a razão da atenuação da amplitude de uma vibração livremente amortecida é o decremento logarítmico  $\delta$ . Este parâmetro é definido como o logaritmo natural da taxa de redução exponencial entre duas amplitudes sucessivas e decrescentes do sinal de vibração no tempo (MORREL, 1996).

O cálculo da proporção entre dois picos de duas amplitudes sucessivas de uma vibração pode ser obtido a partir da curva de resposta que obedece a Equação (2.14), resultando na Equação (2.15).

$$\frac{z(t)}{z(t + T_d)} = \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{e^{-\zeta\omega_n(t_1+T_d)}} = e^{\zeta\omega_n T_d} \quad (2.15)$$

O decremento logarítmico é obtido substituindo-se as expressões (2.12) e (2.13) na Equação (2.15), obtendo-se a Equação (2.16).

$$\begin{aligned} \delta &= \ln \frac{z(t)}{z(t + T_d)} = \ln \left[ \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{e^{-\zeta\omega_n(t_1+T_d)}} \right] = \ln e^{\zeta\omega_n T_d} = \zeta\omega_n T_d \\ &= \zeta\omega_n \frac{2\pi}{\omega_n(1 - \zeta^2)^{1/2}} = \zeta \frac{\omega_n}{\omega_d} 2\pi = \frac{2\pi\zeta}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Estendendo o resultado para  $n$  ciclos separados no histórico do tempo, em que a resposta no tempo  $t_1 = t$  é denotada por  $A$ , e a resposta no tempo  $t_2 = t + n \left(\frac{2\pi}{\omega_d}\right)$  é denotada por  $A_n$ , então o decremento logarítmico  $\delta$  é dado pela Equação (2.17) (SILVA, 2007).

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{z(t)}{z(t + nT_d)} = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{A}{A_n} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.17)$$

portanto, a correlação entre o fator de amortecimento e o decremento logarítmico pode ser expressa conforme a Equação (2.18).

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi/\delta)^2}} \quad (2.18)$$

Quando o amortecimento é baixo ( $\zeta < 0,1$ ), a frequência de amortecimento é praticamente igual à frequência natural, ou seja,  $\omega_d \cong \omega_n$ , e então a Equação (2.17) pode ser reescrita como:

$$\frac{A}{A_n} \cong \exp(\zeta 2\pi n) \quad (2.19)$$

ou

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.20)$$

## 2.3 Resíduo do beneficiamento do mármore e granito

A ABNT NBR 15012 (ABNT, 2013), define rocha ornamental como: material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética.

As rochas ornamentais são largamente empregadas na construção civil, cerca de 75% do total de sua produção líquida são destinadas a: pisos (30%), revestimentos internos e externos (20%), pilares, colunas, soleiras, peças isoladas (como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária) (BEZERRA, 2018; MONTANI, 2018).

Os mármore, travertinos e calcários provém de rochas carbonáticas. As rochas carbonáticas são compostas por calcários e dolomitos. O mármore provém de rocha metamórfica originada de calcário exposto a altas temperaturas e pressão externa. Os calcários são rochas sedimentares compostas principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), enquanto dolomitos são compostos por dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ). Alguns outros minerais carbonáticos, como a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), ankerita ( $\text{Ca, MgFe}(\text{CO}_3)_4$ ) e a magnesita  $\text{MgCO}_3$ , estão associados aos calcários e dolomitos, mas, em geral, em pequenas proporções (BRASIL, 2009).

Os mármore são caracterizados pela presença de minerais carbonáticos com graus variados de recristalização metamórfica. Argilo-minerais (caulinita, illita, clorita, smectita, etc.) e seus produtos metamórficos (sericita, muscovita, flogopita, biotita, tremolita, actinolita, diopsídio, etc.) constituem impurezas comuns, tanto disseminadas quanto laminadas, nas rochas carbonáticas. Processos deposicionais, conduzidos por precipitação química e bioquímica direta de carbonatos em ambientes de água doce, determinam a formação de rochas não fossilíferas e bastante heterogêneas do tipo travertino e marga. O termo mármore é empregado para designar todas as rochas carbonáticas, metamórficas ou não, capazes de receber polimento e lustro (BRASIL, 2009).

As jazidas de granito são um tipo comum de rocha ígnea ou rocha magmática, intrusiva ou plutônica de grão fino não metamórfico, médio ou grosso, composta essencialmente pelos minerais: quartzo, mica e feldspato, tendo como minerais acessórios mica (normalmente presente), hornblenda, zircão e outros minerais.

O crescente uso de granitos no setor da construção civil se deve a sua maior durabilidade e resistência em relação aos mármore, além dos padrões estéticos diferenciados e possibilidades de paginação em pisos e fachadas (ALENCAR, 2013).

A produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento era de 1,8 milhão t/ano, na década de 1920. Em 2013, foram comercializadas no mercado internacional 53,4 milhões de toneladas de rochas brutas e beneficiadas. O notável crescimento do intercâmbio mundial caracterizou as décadas de 1980 e 1990 como a “nova idade da pedra” e o próprio setor de rochas como uma das mais importantes áreas emergentes de negócios mineroindustriais. Em âmbito mundial, estima-se que o setor de rochas esteja movimentando transações comerciais de US\$ 130 bilhões por ano (MONTANI, 2014).

Segundo Montani (2018) a produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento atingiu: 136,5 milhões de toneladas (Mt) em 2014, 140 Mt em 2015, 145 Mt em 2016, 152 Mt em 2017 e a produção brasileira correspondeu a: 8,75 Mt em 2014, 8,2 Mt em 2015, 8,5 Mt em 2016, 8,3 Mt em 2017. Segundo Chiodi Filho (2019) a produção brasileira de rochas ornamentais e de revestimento, foi estimada pela Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) em 9,0 Mt no ano 2018. Na Tabela 11 mostra-se o perfil da produção brasileira de rochas em 2018. No Brasil, as rochas comercialmente classificadas como granitos correspondem a quase 50% do total produzido. Espírito Santo e Minas Gerais são os principais polos de lavra no Brasil.

Tabela 11: Tipos de rochas produzidas em 2018, no Brasil.

<b>Tipo de Rocha</b>	<b>Produção (Mt)</b>	<b>Participação (%)</b>
Granito e similares	4,5	50,0
Mármore e travertino	2,1	23,3
Ardósia	0,4	4,5
Quartzito Foliado	0,3	3,3
Quartzito Maciço	1,1	12,2
Pedra Miracema	0,2	2,2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca etc.)	0,4	4,5
Total estimado	9,0	100

Fonte: Chiodi Filho (2019).

A produção do Espírito Santo inclui apenas mármore e granitos, enquanto a de Minas Gerais abrange granitos, ardósias, quartzitos, pedra-sabão, pedra-talco, serpentinito, itabirito, dentre outros tipos. Estima-se uma produção de rochas de 26 Mt em 2030 e 10,4 Mt de rejeitos (BRASIL, 2009).

### **2.3.1 Fases do processo de fabricação de rochas ornamentais**

Segundo Alencar (2013) o ciclo produtivo das rochas ornamentais pode ser dividido em três etapas bem definidas, desde a atividade mineral até a conformação do produto final. São elas: extração, beneficiamento primário e beneficiamento final.

a) Extração - a extração consiste na remoção de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto da etapa de extração é o bloco de arestas aproximadamente retangulares, de dimensões variadas, que se aproxima, tanto quanto possível, daquelas que proporcionam o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos nas etapas de beneficiamento.

b) Beneficiamento primário - é entendido como o processo de obtenção de chapas em serrarias. São três os métodos básicos para a produção de blocos nas pedreiras: corte com talha-blocos, corte com fio diamantado e corte com tear multilâminas. O talha-blocos é um maquinário de serragem com discos diamantados usados para produtos padronizados (lajotas) no aproveitamento de blocos menores. O corte com fio diamantado é aplicado basicamente ao esquadreamento de blocos e de peças curvas. O tear de multilâminas é o equipamento de corte de blocos mais antigo e mais utilizado para produção de chapas. Este tear possui o menor custo de produção e a mais alta produtividade de chapas em grandes dimensões (1 a 2 m de largura e 2 a 3,5 m de comprimento). A serragem em teares: é executada por meio de um quadro com fixação de lâminas de aço paralelas, que desenvolvem movimentos retilíneos, pendulares ou curvo-retilíneo-curvo sobre a rocha. O processo de serragem nos teares é auxiliado por uma polpa de água, cal e granalha, despejada continuamente sobre a rocha, para otimização do corte e resfriamento das lâminas (MORAES, 2006);

c) Beneficiamento secundário – refere-se ao acabamento de superfícies após a serragem. Esse processo é realizado por meio de levigamento (desbaste), polimento e lustro, ou do apicoamento e flameamento. O desbaste representa o desengrossamento das chapas, com a criação de superfícies planas e paralelas. O polimento produz o desbaste fino da chapa e o fechamento dos poros entre os grãos minerais, criando uma superfície lisa, opaca e mais impermeável que a de uma face natural da mesma rocha.

### **2.3.2 Geração e aplicação dos resíduos de corte de mármore e granito (RCMG)**

Segundo o Relatório Técnico 33 do MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (BRASIL, 2009) ao se comparar os níveis de consumo de água, energia, emissão de CO<sub>2</sub> e

disponibilidade de suas matérias-primas nos processos produtivos das rochas ornamentais com os demais materiais utilizados na construção civil (aço inox, alumínio, cerâmica, concreto, vidro, madeira, laminados e carpetes) considera-se os materiais rochosos naturais os mais ambientalmente sustentáveis, menos impactantes, mais duráveis e recicláveis.

O maior consumo de energia elétrica, no setor de rochas, se dá nas operações de beneficiamento de chapas (BRASIL, 2009). A emissão de CO<sub>2</sub> na cadeia produtiva do setor de rochas no Brasil, ocorre ao se utilizar os equipamentos de jet flame para cortes primários em maciços rochosos. Esta prática está se tornando cada vez menos frequente nas pedreiras (BRASIL, 2009).

Os rejeitos da lavra e do beneficiamento constituem um dos maiores problemas do setor de rochas. O aproveitamento desses rejeitos pode ser canalizado para a produção de chapas aglomeradas ou prensadas, bem como para matérias-primas de uso industrial. Para rochas de processamento especial, que são aquelas extraídas em blocos e serradas em teares ou talha-blocos, para posterior calibragem e acabamento de face, a perda no beneficiamento é de no mínimo 35-40%. Para as rochas de processamento simples, essa perda no beneficiamento pode atingir até 70% da matéria-prima, o que também destaca a necessidade de aproveitamento dos rejeitos do setor de rochas (BRASIL, 2009).

No setor da construção civil a aplicação destes resíduos na produção de concretos, argamassas e cerâmicas tem contribuído para minimizar os impactos ambientais causados por eles. Os benefícios técnicos advindos desta ação são muitos, tanto no sentido de diminuir o consumo de matéria-prima natural e energia do meio ambiente, como no ganho de propriedades mecânicas e durabilidade do produto final.

Ao se incorporar o resíduo de mármore e granito no concreto, a redução do consumo de cimento traz impactos ambientais significativos, minimizando a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o consumo de energia e os recursos naturais (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016).

Os resíduos de mármore e granito podem ser empregados em concretos e argamassas seja substituindo parte da massa de cimento ou da areia, ou simplesmente incorporados à mistura (ALIABDO et al., 2014; MASHALY et al., 2016; RANA; KALLA; CSETENYI, 2015). No CAA estes resíduos tem sido empregados para aumentar o teor de finos da mistura.

Algumas pesquisas mostram que, ao se incorporar no CAA, teores de até 10% de resíduos de mármore e granito em substituição a massa de cimento, não há variação significativa nas propriedades mecânicas do concreto. Para teores maiores que 10% de resíduos aparecem poros na microestrutura da pasta comprometendo as propriedades mecânicas do material (RODRIGUES; BRITO; SARDINHA, 2015; VARDHAN et al., 2015). Allam et al.

(2014) notaram que o uso de 10% de resíduos de granito como substituto da areia em concretos causa aumento de 8% a 12% na resistência à compressão.

Na Tabela 12 estão citados alguns resultados de trabalhos desenvolvidos por diversos pesquisadores, relacionados a CAA com resíduos de mármore e granito.



Tabela 12: Resultados de trabalhos relacionadas a CAA com resíduos de mármore e granito.

Continua

Pesquisas	aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/c	a/aglomerante	Espalhamento (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão 28d (MPa)	Resistência à tração por compressão diametrial 28d (MPa)	Resistência à tração na flexão 28d (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa) 28d	Módulo de elasticidade Dinâmico (GPa)
Lisbôa (2004)	421	421	211	-	0,50	-	770	0,98	6	-	37,3	2,73	-	33,4	-
	427,50	415	208				690	0,89	8,22		41,2	3,04		35,9	
Topçu; Bilir; Uygunoğlu (2009)***	550	495	0	-	-	0,35	650 a 820 (até 200 kg/m <sup>3</sup> )	-	entre 16 a 11	-	>40MPa (até 200 kg/m <sup>3</sup> ) 30MPa (> 200 kg/m <sup>3</sup> )	-	11 a 8 (até 200 kg/m <sup>3</sup> ) 7,5 a 7 (> 200 kg/m <sup>3</sup> )	-	-
	500	450	50			0,38									
	450	405	100			0,43									
	400	360	150			0,49									
	350	315	200			0,55									
	300	270	250			0,65									
250	225	300	0,79												
Gesoglu et al. (2012)**	520	520	0	-	-	0,35	700	0,605	11,3	-	58	3,5 a 4,5 (aos 90 dias)	-	-	-
		Binária	Binária				Binária	Binária							
		494	26				660	0,60	25		56				
		468	52				680	0,69	23		54				
		416	104				670	0,78	26		52				
		Ternária	Ternária				Ternária	Ternária	Ternária		Ternária				
		338	26				680	0,84	16		54				
		312	52				690	0,86	17		51				
260	104	680	0,79	17,5	44										
Manikandan e Felixkala (2015)*	475	343	0	-	-	0,38	645	1,30	12	-	33,47	4,05	5,03	-	-
			175,25				657	1,20	12,67		33,85	4,17	5,94		
			350,5				665	0,83	11,67		32,25	3,99	4,97		
			525,75				675	0,63	10,67		32,16	3,68	4,65		
			701				685	0,70	8,33		31,35	3,41	3,93		
Boukhelkhal et al. (2016)**	470	470	0	0	-	0,40	705	-	-	-	37	-	3,45	-	-
		446,5	23,5	5			710				37		3,21		
		432	47	10			728				34		3,12		
		399,5	70,5	15			730				28		3,11		
		376	94	20			735				25		2,96		

\*em substituição a areia

\*\*em substituição ao cimento

\*\*\* em substituição ao aglomerante

Indicação de resultados totais e/ou parciais, e aproximados apresentados nas pesquisas.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12: Resultados de trabalhos relacionadas a CAA com resíduos de mármore e granito.

Continuação

Pesquisas	aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/c	a/aglomerante	Espalhamento (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa) 28d	Resistência à tração por compressão diametrial (MPa) 28d	Resistência à tração na flexão (MPa) 28d	Módulo de elasticidade (GPa) 28d	Módulo de elasticidade Dinâmico (GPa)
Sadek; El-Attar; Ali (2016)**	600	400	0	-	0,45	-	765	-	10,1	-	61,8	4,7	-	-	
			200(mármore)				660		10,7		39	2,8			
			200(granito)				750		10,3		51,5	3,6			
			200(ambos)				740		10,4		55,1	3,9			
	600	400+40(sílica)	160(mármore)	-	0,45	-	675	-	11	-	44,6	3,4	-	-	-
160(granito)			735				10,5		58,6		4,2				
160(ambos)			730				10,7		63,3		4,4				
Hameed et al. (2016)**	525	500	0	0	0,375	-	670	0,83	-	640	57,54	-	8,40	-	-
		475	25	5	0,399		670	0,82		630	52		7,52		
		450	50	10	0,426		700	0,80		680	52		6,91		
		425	75	15	0,455		710	0,80		705	51		6,81		
		400	100	20	0,488		540	0,70		480	42,5		6,31		
Alyamac; Ghafari; Ince (2017)	-	350	50	14	0,60	-	630	-	3,6	-	38,7	-	-	-	-
			150	43			660		4,2		40,9				
			200	57			620		4,9		36,4				
	-	300	180	60	0,52	-	610	-	5,8	-	46,4	-	-	-	-
330			0,53				630		5,8		46,1				
380			0,55				640		5,5		45,2				
Alyousef et al. (2018)	-	400	100	-	0,50	-	700	0,90	8,45	-	-	-	-	-	-
Tennich; Ouezdou; Kallel (2018)	-	350	0	-	0,51	-	750	0,90	8,15	-	43,51	3,69	-	39,57	49,37
			200				0,50	650	0,85		7,85	35,74		3,56	31,06

\*em substituição a areia

\*\*em substituição ao cimento

\*\*\* em substituição ao aglomerante

Indicação de resultados totais e/ou parciais, e aproximados apresentados nas pesquisas.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12: Resultados de trabalhos relacionadas a CAA com resíduos de mármore e granito.

Conclusão

Pesquisas	aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/c	a/aglomerante	Espalhamento (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa) 28d	Resistência à tração por compressão diametrial (MPa) 28d	Resistência à tração na flexão (MPa) 28d	Módulo de elasticidade estático (GPa) 28d	Módulo de elasticidade Dinâmico (GPa)	
Choudhary; Gupta; Nagar (2020)**	550	Sílica	0	0	-	0,33	705	0,91	11	690	58	-	-	-	-	
		522,5	55	10			715	0,958	8,1	701	60					
		467,5	110	20			710	0,978	8	701	53					
		412,5	165	30			710	0,99	7	701	45					
		357,5	Cinzas volantes+sílica	0			0	725	0,97	7	725					55
		440	55	10			730	0,97	6,5	725	63					
		385	110	20			730	1,0	6,9	730	45					
		330	165	30			725	0,959	7	720	44					
		275														
Vaidevi; Kala; Kalaiyarrasi (2020)*	640	500	0 185 369 738	0 25 50 100	-	0,28	710 650 640 630	0,93 0,81 0,80 0,78	12,7 11 11,5 12		65,34 62,23 53,98 45,74	6,41 4,77 3,09 3,01	10,16 6,71 5,99 5,57	-	-	

\*em substituição a areia

\*\*em substituição ao cimento

\*\*\* em substituição ao aglomerante

Indicação de resultados totais e/ou parciais, e aproximados apresentados nas pesquisas.

Fonte: Próprio autor.

Lisbôa (2004) desenvolveu um estudo sobre as propriedades mecânicas do CAA com resíduos do beneficiamento do mármore e granito (RBMG). Para a seleção do traço do CAA empregado na pesquisa foi utilizado o método de dosagem de Gomes (2002) e obtido dois traços, um com consumo de cimento de  $421 \text{ kg/m}^3$  e outro com  $415 \text{ kg/m}^3$ , um deles empregando apenas o RBMG e o outro utilizando RBMG e 3% de sílica ativa. Lisbôa (2004) notou que o traço com RBMG e 3% de sílica ativa atendeu aos parâmetros das propriedades exigidas no estado fresco do CAA, isto é, o concreto melhorou a capacidade de preencher as fôrmas, a capacidade de passar entre as armaduras e a resistência à segregação, mostrando uma maior estabilidade e coesão da mistura. Os dois concretos apresentaram bons resultados nas propriedades mecânicas estudadas. Para o traço com consumo de cimento de  $421 \text{ kg/m}^3$  foram obtidas resistências à compressão na ordem de 37 MPa, espalhamento de 770 mm e habilidade passante pela caixa L de 0,98. Para o traço com  $415 \text{ kg/m}^3$  de cimento,  $208 \text{ kg/m}^3$  de RBMG e 3% de sílica ativa foram obtidas resistências à compressão na ordem de 41 MPa, espalhamento de 690 mm e habilidade passante pela caixa L de 0,89 (Tabela 12).

No estudo desenvolvido por Topçu; Bilir; Uygunoğlu (2009) sobre CAA contendo de  $0 \text{ kg/m}^3$  a  $300 \text{ kg/m}^3$  de resíduos de mármore em substituição a massa de aglomerante, os pesquisadores verificaram que para teores acima de  $200 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore na mistura de CAA, tanto as propriedades no estado fresco como no estado endurecido são prejudicadas (Tabela 12).

Gesoglu et al. (2012) estudaram diferentes misturas de CAA, binárias (contendo pó de mármore e filer calcário) e ternárias (contendo pó de mármore, filer calcário e cinzas volantes) e observaram que: (a) ao empregar pó de mármore e filer calcário nas misturas de concreto há necessidade de aumentar o teor de superplastificante para o CAA atingir o espalhamento de  $700 \pm 50 \text{ mm}$ ; (b) aumentando-se o teor de pó de mármore e filer calcário nas misturas de concreto observou-se aumento da viscosidade de ambas as misturas tanto binárias como ternárias; os pesquisadores também verificaram que o emprego de pó de mármore aumentou a viscosidade do concreto quando comparado ao concreto de referência; (c) a mistura com 20% de pó de mármore ( $104 \text{ kg/m}^3$ ), em relação a massa de cimento, excedeu ligeiramente o limite superior da classe de viscosidade ( $>25\text{s}$ ); (d) a resistência à compressão, aos 28 dias, para os concretos contendo pó de mármore variou de 44 a 56 MPa, diminuindo com teores crescentes de pó de mármore na mistura.

No trabalho desenvolvido por Oliveira (2015) sobre a utilização de pó de mármore em compósitos cimentícios, foram investigadas misturas cimentícias contendo os teores de 20%, 40%, 60% e 80% de resíduos, em massa, em relação ao cimento, com variação da quantidade

de água de 40% e 50%, em massa, em relação ao cimento. O autor concluiu que a medida que se aumenta a massa do resíduo de pó de mármore na mistura cresce o número de poros na mistura, a absorção de água aumenta e a resistência à compressão diminui. Dentre os compósitos analisados contendo pó de mármore, o melhor resultado de resistência à compressão foi para a composição contendo 70% de cimento, 20% de resíduo e 40% de água.

Manikandan e Felixkala (2015) verificaram um aumento do espalhamento para o CAA com resíduos de granito nas porcentagens 25%, 50%, 75% e 100% em substituição a areia. Constataram espalhamento de 645 mm para o CAA de referência, e demais misturas 657, 665, 675 e 685 mm, respectivamente. O melhor resultado de resistência à compressão e à tração foi para 25% de incorporação de pó de mármore na mistura.

Boukhelkhal et al. (2016) estudaram o efeito da incorporação do pó de mármore, em substituição de parte do cimento, nas propriedades reológicas e mecânicas do CAA. Neste trabalho foram estudadas composições de CAA, com substituições de 5%, 10%, 15% e 20% da massa de cimento pelo pó de mármore. Todas as misturas apresentaram propriedades autocompactáveis satisfatórias no estado fresco. O uso de pó de mármore melhorou as propriedades do CAA no estado fresco. Os pesquisadores concluíram que é possível diminuir a dosagem de superplastificante nas misturas contendo pó de mármore para manter as mesmas propriedades no estado fresco da mistura de controle, o que reduz o custo de produção do CAA. No que diz respeito às propriedades endurecidas, a incorporação de pó de mármore diminui a resistência à compressão, a resistência à tração e a velocidade de pulso ultrassônico do CAA. A mistura com 20% de pó de mármore e quantidade de cimento de  $376 \text{ kg/m}^3$  resultou em resistência à compressão de 25 MPa, o que é similar ao concreto comum geralmente usado nas construções. Os autores concluíram que é possível produzir um CAA econômico quando o cimento é parcialmente substituído pelo pó de mármore.

Segundo Sadek; El-Attar; Ali (2016) os resíduos gerados pela indústria de processamento de mármore e granito podem ser utilizados com sucesso como aditivos minerais na produção de CAA, com o intuito de aumentar o teor de filler da mistura, trazendo benefícios do ponto de vista ambiental e econômico. Os pesquisadores estudaram sobre a incorporação de três tipos de resíduos: pó de mármore, pó de granito e ambos misturados, empregados na fabricação de CAA. Os resultados da pesquisa indicaram que a incorporação de  $160 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore e granito misturados, consumo de cimento  $400 \text{ kg/m}^3$  e  $40 \text{ kg/m}^3$  de sílica ativa são empregados com sucesso como adição mineral na produção do CAA. O desempenho da incorporação de pó de granito foi inferior ao de ambos resíduos misturados. Já o pó de mármore

teve um efeito marginal sobre o desempenho do concreto endurecido, o qual pode ser melhorado com o uso conjunto de sílica ativa.

Hameed et al. (2016) estudaram diferentes composições de CAA, onde substituiu-se a massa de cimento pelo pó de mármore nas seguintes porcentagens: 5%, 10%, 15% e 20%. Os pesquisadores concluíram que o emprego de pó de mármore é eficaz na produção do CAA e recomendam substituir até o teor máximo de 15% de pó de mármore pelo cimento.

Alyamac; Ghafari; Ince (2017) desenvolveram um CAA ecoeficiente, ecológico e viável com a quantidade máxima de pó de mármore empregando a metodologia de superfície de resposta. Os autores estudaram 33 composições de CAA, com diferentes teores de cimento, pó de mármore e relação a/c. Alguns traços estão indicados na Tabela 12. Os autores concluíram que a variação da relação água/cimento, exerce maior efeito sobre a resistência à compressão que a relação mármore/cimento. Foram obtidos CAA com resistência à compressão (46 MPa) com proporções de mármore/cimento de 0,60 e relação água/cimento de 0,52 a 0,55. Os autores concluíram que um CAA ecoeficiente, com propriedades satisfatórias quanto ao espalhamento, viscosidade e resistência à compressão é aquele de relação mármore/cimento de até 0,60 e relação água/cimento menor que 0,55.

Alyousef et al. (2018) estudaram um traço de CAA com a incorporação de lodo de mármore e verificaram que suas características no estado fresco e endurecido são influenciadas pelo método de mistura empregado em sua fabricação. Foram empregados 4 métodos diferentes de mistura, e relacionados momentos diferentes de entrada dos materiais na betoneira. O processo mais eficiente foi aquele que normalmente é empregado nas obras: introdução no misturador de 2/3 da quantidade de água para umedecer os agregados e posteriormente 1/3 da água destinada a reação de hidratação do cimento. Os CCA fabricados por este procedimento apresentaram no estado fresco, ambas propriedades requeridas autocompactante e autonivelante.

Tennich; Ouezdou; Kallel (2018) verificaram que a microestrutura do CAA com resíduos de mármore apresentava formas angulares com textura superficial áspera. Os autores verificaram queda das propriedades mecânicas ao empregar  $200 \text{ kg/m}^3$  de resíduos de mármore no CAA comparando com o CAA de referência, contendo  $250 \text{ kg/m}^3$  de filer calcário.

Ashish (2018) ensaiou concretos contendo pó de mármore em substituição a areia e ao cimento em diferentes porcentagens. Obteve os melhores resultados quanto às propriedades mecânicas no concreto contendo 20% de pó de mármore, ao substituir 10% de resíduo em relação a areia e 10% de resíduo em relação ao cimento.

Taji et al. (2019) investigaram o efeito do uso de resíduos de mármore e granito nas propriedades do concreto. Foram substituídos diferentes teores de parte da massa de cimento pelo resíduo em 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%. Os autores observaram que a utilização de, no máximo, 20% de resíduo na mistura não influencia as propriedades mecânicas do concreto. Os autores atribuem este fato ao efeito de filler do resíduo altamente fino e a maior densidade das misturas com resíduo. Os melhores resultados obtidos, em relação ao concreto sem resíduo, aos 28 dias, para a resistência à compressão e à tração foi para o concreto contendo 5% de resíduo de mármore e 5% de resíduo de granito.

Choudhary; Gupta; Nagar (2020) ensaiaram num total de dezesseis misturas de CAA nas formas: binária (contendo cimento e sílica ativa), ternária (contendo cimento, resíduos de mármore, sílica ativa, e, cimento, sílica ativa, cinzas volantes), e quaternária (contendo cimento, resíduos de mármore, sílica ativa e cinzas volantes). Para os traços de CAA que receberam somente resíduos de mármore e sílica ativa, e, resíduos de mármore, sílica ativa e cinzas volantes indicados na Tabela 12, observa-se influência dos valores dos ensaios de espalhamento, caixa L, funil V e anel J com o aumento do teor de resíduos de mármore na mistura. A resistência à compressão do CAA com 5% de sílica ativa e 10% de resíduos de mármore foi de 60 MPa, aos 28 dias, o segundo maior valor obtido no estudo. Quanto a análise da microestrutura realizada pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) observaram que a incorporação de 10% de resíduos de mármore, 15% de cinzas volantes e 5% de sílica ativa foi a composição de CAA cuja a microestrutura apresentou argamassa muito densa, com número mínimo de vazios, resultando na maior resistência à compressão obtida neste estudo (63 MPa aos 28 dias).

Vaidevi; Kala; Kalaiyarrasi (2020) estudaram a substituição de 0%, 25%, 50% e 100% de agregado fino pelo mármore, e verificaram, aos 28 dias, que a resistência à compressão e à tração diminuem com o aumento do teor de resíduos na mistura. Os autores observaram também que o período de cura influencia na durabilidade e propriedades mecânicas do CAA, obtendo ótimos resultados com até 25% da substituição do resíduo.

## **2.4 Resíduo de borracha de pneu**

O pneu ou pneumático corresponde ao componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em

uma roda de veículo e contendo fluido sobre pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo (Resolução nº 416, CONAMA, 2009).

A Resolução nº 416 (CONAMA, 2009) dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e, considera que os pneus dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que podem resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. É vedada a disposição final de pneus no meio ambiente, tais como: o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto.

Segundo esta Resolução, de acordo com o estado de conservação do pneu, considera-se pneu usado aquele submetido a qualquer tipo de uso e/ou desgaste, englobando os pneus reformados e os inservíveis.

O pneu reformado é aquele que foi submetido a processo de reutilização da carcaça com o fim específico de aumentar sua vida útil, como:

- a) recapagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem;
- b) recauchutagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros;
- c) remoldagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos.

O pneu inservível é aquele que apresenta danos irreparáveis em sua estrutura, não se prestando mais à rodagem ou à reforma.

A destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis, são procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos. Segundo a entidade gestora do sistema de logística reversa de pneus inservíveis (RECICLANIP) as principais destinações dos pneus inservíveis são:

- coprocessamento: pelo seu alto poder calorífico, os pneus inservíveis são largamente utilizados como combustível alternativo em fornos de cimenteiras, em substituição ao coque de petróleo;
- artefatos de borracha: a borracha retirada dos pneus inservíveis dá origem a diversos artefatos, entre os quais tapetes para automóveis, pisos industriais e pisos para quadras poliesportivas;



- laminação: nesse processo, os pneus não-radiais são cortados em lâminas que servem para a fabricação de percintas (indústrias moveleiras), solas de calçados, dutos de águas pluviais etc.;

- asfalto-borracha: adição à massa asfáltica de pó de borracha oriundo da trituração de pneus inservíveis. O asfalto-borracha tem uma vida útil maior, além de gerar um nível de ruído menor e oferecer maior segurança aos usuários das rodovias.

A Resolução nº 416 (CONAMA, 2009) estabelece que, para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), é responsável pelo controle e fiscalização da implementação desta Resolução.

As empresas fabricantes e importadoras de pneus novos têm que preencher dois relatórios disponíveis no Cadastro Técnico Federal (CTF). No primeiro, devem informar as atividades de produção, importação, exportação e envios de pneus às montadoras de veículos novos, indicando a Nomenclatura Comercial do Mercosul (NCM) e as quantidades em massa (kg) e unidades. No segundo, são cadastradas as informações referentes aos pontos de coleta implementados.

As empresas destinadoras de pneus inservíveis, por sua vez, informam o CNPJ da empresa beneficiada (fabricante ou importadora) e as destinações realizadas, indicando a quantidade em quilo e o tipo de tecnologia de destinação utilizada. O próprio sistema vincula as informações, permitindo que as empresas acompanhem a evolução de sua meta de destinação e se esta foi devidamente cumprida. As informações prestadas pelos fabricantes, importadores e empresas destinadoras no relatório de pneumáticos, segundo a Resolução nº 416 (CONAMA, 2009) devem ser declaradas até 31 de março do ano subsequente. No sistema declaratório do IBAMA, existe ainda a obrigatoriedade de realizar a prestação de contas consolidadas por trimestre.

De acordo com o Relatório de Pneumáticos 2019, publicado pelo IBAMA (IBAMA, 2019), são apresentados alguns dados referentes ao ano de 2018:

- total de pneus novos produzidos: 1.072.933,36 toneladas;
- total de pneus novos importados: 272.720,01 toneladas;
- total de pneus novos enviados às montadoras: 267.724,61 toneladas;
- total de pneus novos exportados: 256.594,69 toneladas; e
- quantidade de pneus novos colocados no mercado de reposição: 821.334,06 toneladas.

Na Tabela 13 está indicada a evolução do mercado de reposição de pneus novos (em toneladas) durante os anos de 2009 a 2018.

Tabela 13: Evolução do mercado de reposição de pneus novos (em toneladas).

<b>Ano</b>	<b>Toneladas</b>
2009/2010	800.482,34
2011	779.729,53
2012	684.899,43
2013	764.668,28
2014	797.234,78
2015	760.685,42
2016	729.214,04
2017	839.863,47
2018	821.334,06

Fonte: IBAMA (2019).

A efetiva quantidade de pneus destinados para cumprimento da meta nacional foi 566.323,84 toneladas. Na Tabela 14 estão as tecnologias utilizadas na destinação de pneus inservíveis (em massa, toneladas) durante os anos de 2018.

Tabela 14: Tecnologia de destinação final e quantidade total de pneus inservíveis destinados em 2018.

<b>Tecnologia</b>	<b>Destinação (t)</b>	<b>Percentual</b>
Coprocessamento	326.401,99	57,64%
Granulação	135.019,54	23,84%
Laminação	95.596,99	16,88%
Pirólise	9.305,31	1,64%
Total	566.323,83	100,00%

Fonte: IBAMA (2019).

### **2.4.1 Aplicação dos resíduos de borracha de pneu em concretos**

Diversas pesquisas mostram que a borracha influencia as propriedades nos estados fresco e endurecido do concreto.

No estado fresco do concreto, a trabalhabilidade diminui com teores crescentes de resíduos de borracha, ocorre a incorporação de ar na mistura e há queda da densidade aparente.

Isto ocorre devido ao alto atrito entre as partículas, pela superfície rugosa da borracha e pela baixa densidade (TAHA et al., 2008; THOMAS e GUPTA, 2016; GUO et al., 2017; ABDELALEEM; ISMAIL; HASSAN, 2018). Devido à natureza hidrofóbica da borracha a água adere à sua superfície e aumenta o teor de ar no concreto fresco (SIDDIQUE e NAIK, 2004). Li et al. (2019) também observaram que, para o CAA com resíduos de borracha, ocorre a redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de borracha e diminuição da dimensão da partícula da borracha.

No estado endurecido, estudos experimentais realizados mostram que o emprego da borracha em concretos, reduz sua resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade em comparação com o concreto convencional. Esta redução da resistência mecânica do concreto com resíduos de borracha se deve a: diferenças significativas entre os módulos de elasticidade da borracha e das demais fases do concreto; fraca interface entre a borracha e a matriz do concreto devido a sua natureza hidrofóbica; incorporação de ar durante a mistura do concreto e a tendência a segregação (NAJIM e HALL, 2012; SIDDIQUE e NAIK, 2004; GUPTA; CHAUDHARY; SHARMA, 2014; YOUSSEF et al., 2014; ELCHALAKANI, 2015; THOMAS e GUPTA, 2016; ABDELALEEM; ISMAIL; HASSAN, 2018).

Entretanto, a incorporação de resíduos de borracha ao concreto tem efeito positivo sobre outras propriedades, aumentando a ductilidade, a capacidade de absorção de energia, a tenacidade, a energia de fratura, o amortecimento e a resistência ao impacto (ZHENG; HUO; YUAN, 2008; NAJIM e HALL, 2012; AL-TAYEB et al., 2013; BIDECCI et al., 2017; ABDELALEEM; ISMAIL; HASSAN, 2018; LI et al., 2019). E, segundo Youssf; Elgawady; Mills (2015) o concreto emborrachado pode retardar e reduzir a quantidade de danos que ocorrem sob cargas sísmicas.

A incorporação de resíduos de borracha em concretos e argamassas tem sido realizada visando a atender diferentes aplicações dentro do setor da construção civil, tais como: fabricação de pisos intertravados de concreto (ROCHA JÚNIOR et al., 2016; SILVA et al., 2017), produção de argamassa colante (PFEIFER et al., 2015) e argamassa convencional (ANGELIN et al., 2019), fabricação de blocos de concreto (CARNEIRO et al., 2012), produção de concreto de alto desempenho (SILVA et al., 2019) e CAA (ANGELIN et al., 2020).

Na Tabela 15 estão listadas algumas pesquisas referentes ao emprego de resíduos de borracha no concreto convencional e CAA.

Tabela 15: Pesquisas relacionadas a concreto com resíduos de borracha.

Continua

Pesquisas	Tipo de concreto	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/aglom.	Espalh. (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametrial (MPa)	Amortecimento 28 d	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
Zheng; Huo; Yuan (2008)*	convencional	-	401	-	0 2,62mm 15 30 45 15-40mm 15 30 45	0,45	-	-	-	-	-	-	0,0045-0,0074 2,62mm 0,0062-0,0112 0,0075-0,0142 0,0070-0,0142 15-40mm 0,0068-0,0138 0,0089-0,0174 0,0085-0,0167	43,7 2,62mm 41,2 35,2 31,2 15-40mm 35,4 36,5 32,8	31,8 2,62mm 27,1 24,1 22,3 15-40mm 23,1 24,3 22,1
Najim e Hall (2012)***	CAA	472	363	0 5 10 15		0,36	730		4,9	700	55 36 31 24	4,2 3 3,2 2,2	0,0175 0,0375 0,0410 0,0475	43 41 39 33,75	-
Yung; Yung; Hua (2013)**	CAA	600	300	0 16,29 32,58 48,87 65,16	0 5 10 15 20	0,35	-	-	-	-	32,07 passou #30 28,97 24,89 26,90 22,80 passou #50 30,94 23,53 23,40 21,90 #30 + #50 25,90 23,96 19,21 19,24	-	-	-	-

+ com tratamento

\* em substituição ao volume de brita

\*\* em substituição ao volume de areia

\*\*\* em substituição a massa de areia

\*\*\*\* em substituição ao volume dos agregados miúdo e graúdo

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: Pesquisas relacionadas a concreto com resíduos de borracha.

Continuação

Pesquisas	Tipo de concreto	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/aglom.	Espalh. (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Amortecimento 28 d	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
Moustafa e ElGawady (2015)**	convencional	448,52	336,39		0	0,31	VS	-	-	-	aos 56 dias	-	(0) 0,010625 (10) 0,0111 (20) 0,0127 (30) 0,0130	-	-
					5		150				68				
					10		100				64				
					15		87,5				55				
					20		50				52				
					30		53				51				
							25				45				
	convencional	448,52	336,39		0	0,31	CS	-	-	-	77,5	-	(0) 0,01106 (10) 0,0124 (20) 0,0143 (30) 0,0147	-	-
					5		150				67,5				
					10	0,32	162,5				66				
					15	0,32	150				65				
					20	0,32	162,5				55				
					30	0,32	149				51				
Meesit e Kaewunruen (2017)***	convencional	530	-	-	0	0,44		-	-	-	73	-	(LDM)	-	-
					Borracha 0,425 mm		Borracha 0,425 mm				(0) 0,02614				
					5		50,7				Borracha 0,425 mm				
					10		39,7				(5) 0,03936				
					Borracha 0,075 mm		Borracha 0,075 mm				(10) 0,04052				
					5		55,8				Borracha 0,075 mm				
10	45,7	(5) 0,02995 (10) 0,03319													

† com tratamento

\* em substituição ao volume de brita

\*\* em substituição ao volume de areia

\*\*\* em substituição a massa de areia

\*\*\*\* em substituição ao volume dos agregados miúdo e graúdo

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: Pesquisas relacionadas a concreto com resíduos de borracha.

Continuação

Pesquisas	Tipo de concreto	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/aglom.	Espalh. (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Amortecimento 28 d	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
Hilal (2017)****	CAA	520	364	-	0	0,35	-	-	-	-	72,44	4,36	-	-	50,71
					passou #18						passou #18	passou #18			
					5						67,95	3,68			48,68
					10						64,09	3,51			46,34
					15						60,62	3,32			44,51
					20						57,51	3,12			40,27
					25						49,82	2,42			34,14
					passou #5						passou #5	passou #5			
					5						44,88	3,52			45,76
					10						59,49	3,34			41,43
					15						53,96	3,17			37,61
					20						45,62	2,81			35,83
					25						39,28	2,24			30,98
					passou #18+ #5						passou #18+ #5	passou #18+ #5			
					5						72,44	3,59			46,52
					10						65,14	3,47			43,25
					15						61,51	3,22			42,13
20	56,93	2,86	37,92												
25	49,12	2,26	32,71												

+com tratamento

\* em substituição ao volume de brita

\*\* em substituição ao volume de areia

\*\*\* em substituição a massa de areia

\*\*\*\* em substituição ao volume dos agregados miúdo e graúdo

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: Pesquisas relacionadas a concreto com resíduos de borracha.

Conclusão

Pesquisas	Tipo de concreto	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	teor de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	teor de resíduo (%)	a/aglom.	Espalh. (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametrial (MPa)	Amortecimento 28 d	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
Sugapriya e Ramkrishnan (2018)***	convencional	-	465	-	5	0,49	-	-	-	-	28	-	0,0151	-	25
					10						24,2		0,0175		24
					15						23		0,020		23
					20						21,5		0,025		22
Aslani et al. (2018a)	CAA	450	180	-	0	0,45	690	-	-	650	50,39	3,70	-	-	-
					2mm		2mm**			2mm	2mm	2mm			
					10		650			550	35,78	3,41			
					20		630			540	29,81	2,86			
					30		620			525	25,59	2,70			
					40		580			490	19,60	2,26			
					5mm		5mm**			5mm	5mm	5mm			
					10		645			545	40,68	4,32			
					20		640			520	33,23	3,15			
					30		630			480	29,42	3,13			
					40		610			455	26,32	2,49			
					10mm		10mm*			10mm	10mm	10mm			
					10		640			590	31,40	2,93			
					20		590			575	22,21	2,71			
30	570	550	19,34	2,51											
40	515	515	16,45	1,84											
Si et al. (2018)**	CAA	550	430	0	0	0,39	700	-	5,02	-	67	5,30	-	-	-
				51,23	15		662		5,75		43	4,02			
				51,23	15+		665		5,41		44	4,26			
				85,39	25+		600		7,04		31	3,54			
Li et al. (2019)**	CAA	530	344	0	0	0,35	630	0,95	-	-	43,0	-	0,00375	45	-
				30	10		615	0,90			36,4	0,00450	40		
				60	20		610	0,82			32,7	0,00525	35		
				90	30		590	0,78			28,6	0,00625	30		

+com tratamento

\* em substituição ao volume de brita

\*\* em substituição ao volume de areia

\*\*\* em substituição a massa de areia

\*\*\*\* em substituição ao volume dos agregados miúdo e graúdo

Fonte: Próprio autor.

Zheng; Huo; Yuan (2008) observaram diminuição do módulo de elasticidade estático e dinâmico com a incorporação de borracha no concreto. Para o concreto com resíduos de borracha de 2,62 mm, o módulo de elasticidade dinâmico foi maior que o estático entre 37% e 52%. Quanto ao amortecimento, os autores notaram maior amortecimento para concretos com 30% de borracha, contendo partículas de borracha de maiores dimensões (15 a 40mm).

Najim e Hall (2012), ao estudarem CAA com diferentes porcentagens de borracha (5, 10 e 15) em substituição aos agregados, também verificaram que houve diminuição da resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade dinâmico e aumento do coeficiente de amortecimento com crescentes teores de borracha na mistura.

Yung; Yung; Hua (2013) pesquisaram o emprego de resíduos de borracha na produção de CAA, em substituição ao volume do agregado miúdo, nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20%. Os resíduos de borracha de pneus apresentaram duas granulometrias (resíduos que passaram pela #30 de 0,6 mm e pela #50 de 0,3 mm). Foram ensaiados três grupos de CAA, sendo: o primeiro grupo, com resíduos que passaram pela peneira #30 de 0,6 mm; o segundo grupo, com resíduos que passaram pela #50 de 0,3 mm; o terceiro grupo, com resíduos que passaram nas peneiras #30 + #50. Os melhores resultados de resistência à compressão foi obtido para o primeiro e segundo grupos, indicados na Tabela 15. Os pesquisadores observaram quanto a resistência à compressão que, para o CAA contendo borracha, o maior valor desta propriedade foi para o traço com 5% de resíduos, que passaram pela #50 de 0,3mm.

Moustafa e Elgawady (2015) investigaram o efeito do emprego de borracha de pneus em concretos de alta resistência, nas propriedades mecânicas e dinâmicas. Foram utilizadas três diferentes granulometrias de borracha, nas faixas de 8-14mm, 14-30mm e 30mm. Duas diferentes composições de concreto emborrachado foram desenvolvidas, sendo:

- uma com relação a/c e superplastificante constantes, com o propósito de variar o espalhamento (VS). Neste caso, conforme Tabela 15, observou-se perda de espalhamento com teores crescentes de borracha, que se acentuou acima de 10% de incorporação de borracha na mistura, afetando a trabalhabilidade; e

- outra com relação a/c e superplastificante variáveis com o propósito de manter constante o espalhamento (CS). Neste caso, notou-se que a queda do espalhamento é quase constante e conseqüentemente a trabalhabilidade é pouco afetada.

Na Tabela 15, observa-se a redução da resistência à compressão, aos 56 dias, dos concretos com o aumento do teor de borracha, sendo este efeito mais severo ao variar o espalhamento (VS) em comparação ao espalhamento constante (CS). Também observa-se uma tendência crescente da taxa de amortecimento com o aumento no teor de borracha para misturas



CS e VS. Os autores concluíram que a composição de concreto que manteve constante o espalhamento (CS), apresentou menor variação nos resultados de amortecimento e propriedades de amortecimento mais altas em comparação a composição de concreto que variou o espalhamento (VS).

Aslani (2016) estudou o efeito de diferentes tipos e teores de borracha nas propriedades mecânicas do concreto como: resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Para a resistência à compressão, aos 28 dias, foram obtidos:

- para concretos com borracha de dimensão de 0,5-5 mm, a resistência à compressão foi reduzida em 25%, 32%, 45%, 67%, 81% e 88% para as misturas de concreto com borracha, em substituição aos agregados, nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%;
- para concretos com borracha de dimensão de 5-25 mm, a resistência à compressão foi reduzida em 29%, 38%, 51%, 74%, 86% e 92% para as misturas de concreto com borracha nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%; e
- para concretos com borracha de ambas dimensões de 0,5-5 e 5-25 mm, a resistência à compressão foi reduzida em 42%, 55%, 73%, 92% e 95% para as misturas de concreto com borracha nos teores 10%, 15%, 25%, 50% e 60%.

Os autores verificaram que, a diminuição da resistência à tração com o aumento do teor de borracha foi menor comparando-se com a resistência à compressão. Para concretos com borracha de dimensão de 0,5-5 mm, a resistência à tração, aos 28 dias, foi reduzida em 18%, 23%, 31%, 47%, 60% e 69% para as misturas de concreto com borracha nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%. Para concretos com borracha de dimensão de 5-25 mm, a resistência à tração foi reduzida em 22%, 29%, 40%, 62%, 76% e 84% para as misturas de concreto com borracha nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%. E, para concretos com borracha de ambas dimensões de 0,5-5 e 5-25 mm, a resistência à tração foi reduzida em 21%, 30%, 45%, 70% e 76% para as misturas de concreto com borracha nos teores 10%, 15%, 25%, 50% e 60%.

Segundo Aslani (2016) o módulo de elasticidade também foi afetado pela dimensão das partículas e quantidade de borracha como na resistência à compressão. O módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos com borracha foram reduzidos em:

- 17%, 22%, 31%, 49%, 62% e 72% para concretos com borracha nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100% (para borracha com dimensão de 0,5-5 mm);
- 23%, 28%, 36%, 54%, 67% e 76% para concretos com borracha nas proporções 10%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100% (para borracha com dimensão de 5-25 mm); e

- 37%, 58%, 65%, 87% e 91% para concretos com borracha nos teores 10%, 15%, 25%, 50% e 60% (para borracha de ambas dimensões de 0,5-5 e 5-25 mm).

Hilal (2017) investigou o efeito da dimensão e do teor de borracha no estado endurecido do CAA. Foram estudadas diferentes composições de CAA com relação água/aglomerante de 0,35 e consumo de aglomerante de  $520 \text{ kg/m}^3$ . Foi empregado nas misturas um percentual de 30% de cinzas volantes em substituição à massa de cimento; e os agregados miúdos e graúdos foram substituídos, em volume, pelos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de borracha. Foram estudadas três granulometrias de borracha (resíduos que passaram pela #18 de 1 mm, pela #5 de 4 mm, e, ambas granulometrias 40% de resíduos que passaram pela #18 + 60% que passaram pela #5). De acordo com os resultados obtidos pelos autores, foi verificado que:

- quanto a resistência à compressão, aos 90 dias, das misturas de CAA com borracha (Tabela 15), o emprego de borracha que passou pela #5 de 4 mm, diminuiu a resistência à compressão do CAA comparando-se com o emprego de borracha que passou pela #18 de 1 mm. De acordo com a crescente porcentagem de borracha incorporada na mistura a resistência à compressão diminuiu sistematicamente. Com o emprego da borracha a aderência entre as partículas de borracha e a pasta de cimento é diminuída, somado ao fato da borracha possuir menor resistência que o agregado natural. Os melhores resultados obtidos para a resistência à compressão de CAA contendo borracha, foi para as misturas com ambas granulometrias (40% de resíduos que passaram pela #18 + 60% que passaram pela #5);

- para a resistência à tração observou-se que esta reduziu em menor proporção que a resistência à compressão, para os traços contendo borracha;

- os resultados indicaram que os CAA produzidos com borracha que passou pela #18 de 1 mm resultou em maior resistência à tração;

- o módulo elástico estático diminuiu com o aumento da dimensão e teor de borracha semelhante ao observado para ambas as resistências à tração e à compressão;

- a resistência à flexão da mistura de referência é o valor mais alto comparando-se com as demais misturas estudadas. Enquanto que, para os CAA produzidos com borracha que passou pela #5, notou-se menor resistência à flexão e para os CAA produzidos com borracha que passou pela #18 maior resistência à flexão;

- o maior resultado de energia de fratura foi obtido para a mistura de referência, e a diminuição sistemática da energia de fratura foi observada com o crescente aumento do teor de borracha; e

- a ductilidade do concreto, aumentou significativamente com o aumento da fração volumétrica da borracha. O melhor valor da ductilidade foi obtido nas misturas com 25% de borracha.

Hilal (2017) atribui a diminuição da resistência com o aumento do teor de borracha no concreto a dois motivos: (a) as fissuras são iniciadas rapidamente perto das partículas de borracha na mistura; (b) as partículas de borracha funcionam como vazios na matriz de concreto devido a ausência de aderência entre as partículas de borracha e a pasta (Aslani, 2016).

Segundo o pesquisador a diminuição do módulo de elasticidade do concreto com borracha ocorreu devido a diversas razões como: a) a borracha age de forma semelhante aos vazios na matriz, devido à sua fraca ligação entre a matriz do concreto; b) o resíduo de borracha atua como inclusões fracas na pasta de cimento endurecida, produzindo alta tensão interna perpendicular à direção da carga aplicada; c) a resistência do concreto de cimento Portland depende principalmente do agregado graúdo, dimensão, dureza e densidade dos agregados; d) o resíduo de borracha é mais elasticamente deformável em comparação com a matriz.

Em estudo realizado por Meesit e Kaewunruen (2017) relacionado a utilização de borracha no concreto, foram desenvolvidos traços de concreto contendo diferentes teores de borracha (5% e 10% em substituição a massa da areia) e duas granulometrias de borracha (0,425 mm e 0,075 mm), indicados na Tabela 15. Os autores concluíram que:

- concretos com partículas de borracha de dimensão de 0,425 mm apresentaram amortecimento maior que concretos com partículas de borracha de dimensão de 0,075 mm; e
- a quantidade de borracha também influenciou esta propriedade, ou seja, concretos contendo 10% de borracha apresentaram maior amortecimento que aqueles com 5% de borracha.

Além disso, também foi verificado pelos pesquisadores que a idade de cura influencia o amortecimento. Os concretos ensaiados aos 28 dias apresentaram uma taxa de amortecimento relativamente menor que aqueles ensaiados aos 7 dias.

Sugapriya e Ramkrishnan (2018) estudaram três famílias de concreto: a primeira contendo borracha sem tratamento, a segunda contendo borracha com tratamento e a terceira contendo borracha com tratamento e escória de alto forno. Na Tabela 15 estão os dados referentes a primeira família de concreto, ou seja, concreto contendo borracha sem tratamento. Apesar da resistência à compressão e do módulo de elasticidade reduzirem com o aumento do teor de borracha no concreto, a propriedade de amortecimento é melhorada. A frequência foi inversamente proporcional à taxa de amortecimento, e a primeira família (Tabela 15) foi mais

eficaz no amortecimento de vibrações que as demais famílias. Isto indica claramente que a estrutura do concreto com borracha possui uma tolerância de vibração muito alta.

Aslani et al. (2018a) pesquisaram sobre a influência da dimensão das partículas de borracha em substituição aos agregados naturais nas propriedades nos estados fresco e endurecido do CAA. Foram utilizadas três dimensões de partículas de borracha: 2 mm, 5 mm e 10 mm. Três séries diferentes de composições de CAA foram executadas, com relação a/c de 0,45 e teor de materiais cimentícios de 450 kg/m<sup>3</sup>. A primeira e a segunda séries substituíram o agregado miúdo pela borracha de 2 e 5 mm. E, a terceira série substituiu o agregado graúdo pela borracha de 10 mm. As três dimensões de borracha foram substituídas, em volume, nos teores 10%, 20%, 30% e 40%. Os resultados no estado fresco indicaram que o emprego de borracha tem um efeito negativo nas propriedades reológicas do CAA. As partículas de borracha de maior dimensão requerem mais energia para superar o atrito interno e fluir mais facilmente (HESAMI; HIKOUEI; EMADI, 2016). Para minimizar este problema os autores sugerem ainda aumentar o teor de finos na mistura. Quanto a resistência à compressão os autores constataram diminuição desta propriedade em relação ao CAA controle para teores crescentes de borracha. Esta diminuição foi menor para partículas de dimensão de 5 mm, seguida pelas de 2mm e 10 mm. O mesmo comportamento foi observado para a resistência à tração.

Na sequência desta pesquisa Aslani et al. (2018b) investigaram as propriedades nos estados fresco e endurecido do CAA com agregados reciclados de concreto, resíduos de borracha e agregados de escória. Foram estudadas três séries (séries I, II e III) diferentes de CAA cujo concreto controle apresentava relação a/c de 0,45 e teor de materiais cimentícios de 450 kg/m<sup>3</sup>.

Na série I houve a substituição, em volume, dos agregados naturais miúdo e graúdo pelos agregados reciclados de concreto nas proporções 10%, 20%, 30% e 40%. Na série II houve a substituição de 20% do volume do agregado graúdo pela borracha. O agregado miúdo natural foi substituído pelo agregado fino reciclado, em volume, nas proporções 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Na série III houve a substituição de 50% do volume do agregado graúdo natural pela escória, e, o agregado miúdo natural foi substituído pelo agregado fino reciclado, em volume, nas proporções 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os pesquisadores concluíram que:

- as misturas propostas são capazes de reduzir a quantidade de cimento em 40%, o que significa que todas as misturas têm consumo de 180 kg/m<sup>3</sup> de cimento;

- a medida que a porcentagem de substituição de agregados reciclados aumenta, a densidade do concreto diminui. Isso se deve à densidade dos agregados reciclados que são me-

nos densos que os agregados naturais;

- a medida que a porcentagem de substituição de agregados reciclados aumenta, a capacidade de escoamento e a habilidade passante diminui;

- a série I apresentou a mais alta resistência à compressão das três séries ensaiadas. Um aumento na porcentagem de agregado reciclado graúdo mostra uma diminuição na resistência à compressão na série I. A substituição do agregado natural pelo reciclado de concreto diminuiu de 47,74 MPa para 43,82 MPa, ou seja, resultando em uma redução de 13% na resistência à compressão;

- a série II produziu as menores resistências à compressão das três séries. Observa-se que, devido a fraca ligação entre os agregados de borracha e a matriz de cimento circundante, desenvolve-se uma zona de transição interfacial fraca, que faz com que as partículas de borracha atuem como vazios e, assim, reduzam sua resistência à compressão. Na série II houve um aumento das resistências dos concretos, ao incorporar agregado miúdo reciclado, em relação ao traço de referência. Verifica-se esta mesma tendência de comportamento para a série III; e

- os resultados mostraram que um aumento na resistência à tração é observado quando o agregado reciclado é adicionado a mistura. Foram obtidos os seguintes valores de resistência aos 28 dias: variando de 3,70 a 4,38 MPa, 2,71 a 3,07 MPa e 3,27 a 3,89 MPa para as séries I, II e III, respectivamente. Os resultados da resistência à tração, em geral, mostraram tendências semelhantes as dos resultados de resistência à compressão, sendo que a série I apresentou os maiores resultados e a série II, o menor.

Si et al. (2018) estudaram sobre a incorporação de borracha no CAA nos teores 15 e 25%. Os autores concluíram que os traços de CAA contendo borracha, no estado fresco, reduzem a fluidez da mistura. Para o traço de CAA com 15% de borracha tratada com NaOH, em substituição ao volume de areia, observou-se menor perda de fluidez em relação ao CAA com a mesma quantidade de borracha, porém sem tratamento. No estado endurecido do CAA, a resistência à compressão do CAA contendo borracha diminuiu com o aumento do teor de resíduos. Entretanto esta diminuição é menor para o CAA com borracha tratada com NaOH. Isso se deve a maior resistência de aderência entre as partículas de borracha e pasta de cimento. Além disso, o CAA modificado com borracha reduziu a fragilidade e melhorou a ductilidade em comparação com o CAA normal. A resistência à tração apresentou o mesmo comportamento para a resistência à compressão; porém, a redução da resistência à tração foi menor que da resistência à compressão, pois os resíduos de borracha impedem a propagação de fissura no concreto. Os pesquisadores também notaram que a incorporação de borracha aumentou a resistividade elétrica das misturas de CAA, sendo maior este resultado para o CAA com

borracha tratada com NaOH. E, a velocidade de transmissão ultrassônica diminuiu com teores crescente de borracha no CAA.

Li et al. (2019) estudaram sobre CAA contendo partículas de borracha de dimensão 1 a 2 mm, e observaram a tendência da redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de borracha e diminuição da dimensão da partícula da borracha. Os autores também verificaram que, com crescentes teores de borracha na mistura, no estado endurecido, ocorre diminuição da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico e aumento do amortecimento indicando que este material possui melhor capacidade de dissipação de energia quando submetido a cargas dinâmicas.

## 2.5 Fibras de aço

Segundo Figueiredo (2011) os concretos com fibras podem ser considerados como compósitos cujas fases principais são: a matriz de concreto e as fibras. Existem fibras de diversos tipos de materiais como: aço, vidro, polipropileno, náilon, materiais naturais, etc.

As fibras de aço conforme a ABNT NBR 15530 (ABNT, 2019) são adequadas ao uso como material de reforço para concreto, pois possuem coeficiente de dilatação térmica igual ao do concreto, módulo de Young no mínimo cinco vezes maior que o do concreto e a deformação das fibras aço-carbono ocorrem somente acima de 370 °C. A norma ABNT NBR 15530 (ABNT, 2019) classifica a fibra de aço, em relação a:

- fabricação: Grupo I (arames trefilados a frio), Grupo II (chapas cortadas), Grupo III (arames trefilados a frio e escarificados), Grupo IV (fibras produzidas por fusão), Grupo V (usinadas a partir de blocos de aço);
- forma: as fibras podem ser retas ou deformadas;
- revestimento: quando as fibras de aço são revestidas o tipo e a quantidade característica deve ser declarados;
- classificação do aço: baixo teor de carbono (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
- tolerâncias de comprimento e diâmetro da fibra: classe A, classe B, classe C expressos na Tabela 16.

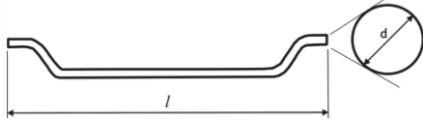
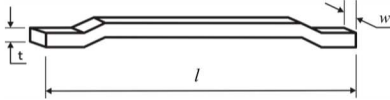
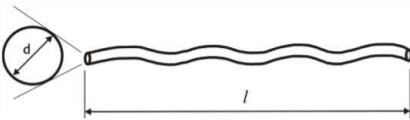
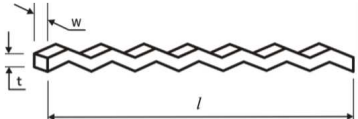
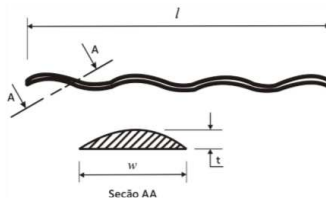
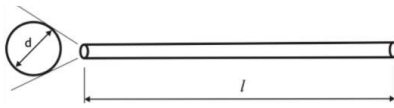
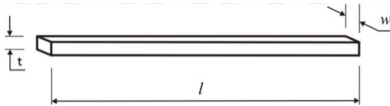
Na Tabela 17 está a classificação e perfil das fibras de aço conforme indicado na ABNT NBR 15530 (ABNT, 2019).

Tabela 16: Tolerâncias para comprimento e diâmetro das fibras.

Propriedade	Intervalo	Desvio do valor individual em relação ao valor declarado			Desvio da média em relação ao valor declarado		
		Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C
comprimento e comprimento desenvolvido $l$ (ou $l_d$ )	> 30 mm	± 3 mm	± 3 mm	± 10 %	± 5 %		
	≤ 30 mm	± 10 %	± 10 %		± 1,5 mm		
diâmetro (equivalente) $d$	> 30 mm ≤ 30 mm	± 0,02 mm	± 5 %	± 10 %	± 0,015 mm	± 5 % ± 0,015 mm	± 5 % ± 0,015 mm
comprimento $l$ diâmetro $\lambda$	-	±15 %			±7,5 %		

Fonte: ABNT NBR 15530 (ABNT, 2019).

Tabela 17: Classificação e perfil das fibras de aço.

Tipo	Grupo	Perfil da fibra
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: ABNT NBR 15530 (ABNT, 2019).

Onde:  
 $d$  = diâmetro da fibra  
 $l$  = comprimento da fibra  
 $t$  = espessura da fibra  
 $w$  = largura da fibra



### 2.5.1 Concreto autoadensável com fibras de aço

O concreto reforçado com fibras é composto de cimento hidráulico, água, agregados miúdos e graúdos e fibras discretas descontínuas, podendo ser empregadas pozolanas e aditivos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O concreto autoadensável reforçado com fibras de aço tem sido aplicado em diversos tipos de construções, tais como: pavimentos, calçadas, estacionamentos, túneis, pontes, estabilização de taludes, obras hidráulicas, concreto pré-moldado não estrutural, elementos estruturais (SORELLI; MEDA; PLIZZARI, 2006; SERNA, 2009; FUENTE, 2012; CUENCA; ECHEGARAY-OVIEDO; SERNA, 2015). Segundo Cuenca e Serna (2013) emprega-se fibras de aço em elementos estruturais de concreto nos quais é difícil ou mesmo impossível utilizar reforços transversais.

A incorporação de fibras de aço no concreto autoadensável influencia suas propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco, as fibras de aço reduzem a fluidez e dificultam a habilidade passante por obstáculos da mistura (EFNARC, 2005; ATHIYAMAAN e GANESH, 2020; DAWOOD e RAMLI, 2012). As propriedades reológicas do CAA são afetadas pelos materiais componentes da mistura como diâmetro máximo do agregado, relação a/c, adições, aditivos, tipo de fibra (GHASEMI; GHASEMI; MOUSAVI, 2019). Observa-se também no estado fresco do CAA que, devido a sua fluidez elevada, as fibras de aço, no processo de lançamento do concreto, influenciam o desempenho mecânico do conjunto em função de sua distribuição e orientação (JEN; TRONO; OSTERTAG, 2016; ALFERES FILHO; MONTE; FIGUEIREDO, 2019; ABRISHAMBAF; BARROS; CUNHA, 2013).

Em estudo desenvolvido por Alferes Filho; Monte; Figueiredo (2019) em elementos planos de CAA, os pesquisadores notaram que a distribuição da fibra não ocorre de maneira uniforme durante o lançamento do concreto na fôrma, nem em termos de conteúdo e nem de orientação. E, verificaram também que:

- há concentrações mais elevadas de fibras na porção central da placa onde o concreto é vertido, possivelmente devido à baixa viscosidade do concreto;
- na análise de orientação nos três eixos, o distanciamento do ponto de concretagem induz a orientação das fibras no plano horizontal; e
- o fluxo de concreto durante a moldagem da placa também causa direções preferenciais de orientação das fibras no sentido transversal às linhas de fluxo.

Em relação ao estado endurecido do CAA reforçado com fibras de aço segundo Figueiredo (2011) ao se adicionar fibras de resistência e módulo adequados ao concreto num teor apropriado, o concreto deixa de ter um comportamento frágil. A fibra age como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura que aparece no concreto. Ocorre a diminuição da velocidade de propagação das fissuras no concreto, e este passa a ter um comportamento pseudo-dúctil. O desempenho após a fissuração do concreto depende do teor de fibras, da geometria e do comprimento crítico da fibra. É recomendado que a fibra tenha comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto.

Quanto a resistência à compressão, não há mudança significativa, com ligeiras melhoras para esta propriedade (POVEDA et al., 2017; RUIZ et al., 2019). A resistência à tração na compressão apresenta comportamento similar ao da resistência à tração na flexão, ou seja, seus valores aumentam com teores crescentes de fibras de aço no CAA (ATHIYAMAAN e GANESH, 2020).

As fibras de aço impedem o crescimento de fissuras no concreto e aumentam a absorção de energia (ALBERTI; ENFEDAQUE; GALVEZ, 2015; GHASEMI; GHASEMI; MOUSAVI, 2019). O concreto reforçado com fibras é um material compósito que possui um comportamento pós-fissuração melhorado devido a ponte que é feita entre as faces das fissuras pelas fibras (CUENCA; ECHEGARAY-OVIEDO; SERNA, 2015).

Poveda et al. (2017) notaram que, em CAA com fibra de aço, de fator de forma igual a 64 e comprimento de 35 mm, a resistência residual aumenta notavelmente quando a quantidade de fibra é superior a  $15 \text{ kg/m}^3$ .

Cuenca; Echegaray-Oviedo; Serna (2015) desenvolveram um estudo sobre doze vigas de CAA reforçado com fibras de aço normais e de alta resistência, de diferentes comprimentos, resistências e fator de forma, e duas resistências de CAA (40 a 50 MPa e de 80 a 100 MPa, aos 28 dias de idade). Os pesquisadores verificaram que a resistência ao cisalhamento de vigas de CAA reforçado com fibras de aço depende fortemente do tipo da fibra e da resistência à compressão da matriz do concreto. Os concretos com fibras de alta resistência e matriz de resistência média (40 a 50 MPa) apresentaram comportamento dúctil e o concreto de alta resistência (80 a 100 MPa) com fibras de resistência normal apresentou comportamento frágil. As vigas atingiram uma capacidade de suporte mais alta ao serem utilizadas fibras de aço de alta resistência.

Uma das propriedades mais influenciadas do CAA com fibras pode ser observada pela curva tensão x deformação onde a deformação corresponde a queda linear na resistência do

material que ocorre imediatamente após o pico do limite de plasticidade (VIGNJEVIC et al., 2018).

Nas Tabelas 18 e 19 estão os resultados de algumas pesquisas relacionadas a CAA com fibras de aço.

Tabela 18: Resultados de pesquisas de CAA com fibras de aço, no estado fresco.

Pesquisas	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de forma (l/d)	Comprimento fibra (mm)	teor de fibra de aço (% vol)	fibra de aço (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Espalhamento (mm)	Caixa L	Funil V (s)	Anel J
Alferes Filho (2016)	404	65	35	0 0,25 1,02 1,53	0 20 80 120	-	785 795 775 780	1,0 1,0 0,74 0	-	-
Shimosaka (2017)	439,53	55	30*	0 0,4 0,8 1,2 1,5	-	-	850 775 730 700 585	-	-	5 25 20 40 50
Poveda et al. (2017)	360	64	35	0 0,2 0,4 0,6 0,8	-	-	790 770 770 650 580	-	-	-
Ismail e Hassan (2017)	275 300	- -	35	- -	27,48	- -	730 715 710 725 720 700	0,80 0,78 0,75 0,85 0,80 0,75	9,75 10,65 12,05 9,80 12,50 14,30	- -
Aslani e Kelin (2018)	180	80	60	0 0,25 0,50 0,75 1,00	-	-	660 650 610 620 610	-	-	640 590 550 540 570
Ghasemi; Ghasemi; Mousavi (2019)	375***		30	0,1 0,3		0,52 0,52	600 590	0,83 0,82	-	-
Gokulnath; Ramesh; Sivashankar (2020)	-	-	-	0,3** 0,6 0,9 1,2	-	-	-	0,83 0,86 0,92 0,97	10 12 11 13	-

\*geometria da fibra - Ancorada (A)

\*\*valores referentes a areia de rio.

\*\*\* CAA com agregado graúdo no intervalo de 4,75-9,5mm

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19: Resultados de pesquisas de CAA com fibras de aço, no estado endurecido

Continua

Pesquisas	Tipo de concreto	Resíduo borracha kg/m <sup>3</sup>	aglomerante	a/c	a/aglom.	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de forma (l/d)	Comprimento fibra (mm)	teor de fibra de aço (% vol)	fibra de aço (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa) 28d	Resistência à tração por compressão diametral (MPa) 28d	Resistência à tração na flexão (MPa) 28d	Módulo de elasticidade (GPa) 28d
Shimosaka (2017)	CAA	-	-	-	-	439,53	55	30*	0	-	48,52	4,23	-	27,11
									0,4		51,10	5,15		30,26
									0,8		53,50	6,42		31,84
									1,2		54,44	6,75		33,90
									1,5		59,20	7,94		35,61
Poveda et al. (2017)	CAA	-	-	-	-	360	64	35	0	-	31,6	-	-	18,5
									0,2		32,5			19,4
									0,4		30,7			18,5
									0,6		32,1			18,3
									0,8		30,3			19,0
Ismail e Hassan (2017)	CAA	16,1	550		0,40	275		35	1,0	27,48	67,56	5,27	6,71	27,95
		32,2									54,25	4,66	6,11	26,65
		48,3									44,94	4,34	5,63	25,96
		45,1									47,06	4,61	6,04	26,03
		60,1									45,35	4,34	5,76	25,30
75,1	39,90	4,19	5,17	22,70										
Aslani e Kelin (2018)	CAA	48,12+	-	-	-	180	80	60	0	-	12,90	1,79	-	17,50
									19,10		2,63	27,50		
									19,00		2,00	32,50		
									21,20		2,05	42,00		
									17,60		2,37	47,50		
Xie et al (2018)	convencional	0+	358,3	-	0,48	-	45	32	-	78	***58,84	-	-	50,56
		15,7									47,86			39,23
		31,3									42,83			35,92
		47									33,59			33,70
		62,7									31,68			31,29
	30,96	30,17												

\*geometria da fibra - Ancorada (A)

\*\*valores referentes a areia de rio.

\*\*\* CAA com agregado graúdo no intervalo de 4,75-9,5mm

\*\*\*\*concretos com 10% sílica ativa

+ em substituição ao volume da areia

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19: Resultados de pesquisas de CAA com fibras de aço, no estado endurecido.

Conclusão

Pesquisas	Tipo de concreto	Resíduo borracha kg/m <sup>3</sup>	aglomerante	a/c	a/aglom.	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de forma (l/d)	Comprimento fibra (mm)	teor de fibra de aço (% vol)	fibra de aço (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa) 28d	Resistência à tração por compressão diametrial (MPa) 28d	Resistência à tração na flexão (MPa) 28d	Módulo de elasticidade (GPa) 28d
Ghasemi; Ghasemi; Mousavi (2019)	CAA	-	-	-	-	375***		30	0,1 0,3	-	32,4 26,15	3,55 4,17	-	27,54 23,00
Gokulnath; Ramesh; Sivashankar (2020)	CAA	-	-	-	-	-	-	-	0,3 0,6 0,9 1,2	-	-	3,75 3,85 4,2 4,9	8,5 6,8 7,5 6	-
Eisa et al. (2020)	convencional	0 36,5 73 109,5 146	-	0,38	-	500	62,50	50	1,0	78	47,20 44,30 39,50 32,20 24,17	6,65 4,81 4,22 3,92 3,47	8,67 8,05 7,11 6,57 6,22	22,84 20,70 18,20 15,04 11,50

\*geometria da fibra - Ancorada (A)

\*\*valores referentes a areia de rio.

\*\*\* CAA com agregado graúdo no intervalo de 4,75-9,5mm

\*\*\*\*concretos com 10% sílica ativa

+ em substituição ao volume da areia

Fonte: Próprio autor.

Segundo Alferes Filho (2016) para concretos com teores acima de  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibra de aço de 35 mm, foram encontrados valores no ensaio de Caixa-L (restringida por três barras metálicas) fora dos limites recomendados pela EFNARC (2005), não podendo ser classificados como CAA. Para o teor de fibra de aço de  $80 \text{ kg/m}^3$ , foi constatado bloqueio parcial do material provocado pelas barras metálicas e para o teor de  $120 \text{ kg/m}^3$ , o impacto da presença das barras foi ainda maior, não havendo fluxo considerável, observando-se a quase totalidade de material retido nas barras. Os resultados do espalhamento apresentaram pouca variação em função do teor de fibras, embora o pesquisador constatou ocorrência de segregação em fluxo livre para os concretos com os teores de fibra de aço de  $80 \text{ kg/m}^3$  e  $120 \text{ kg/m}^3$ .

Shimosaka (2017) testou três tipos de fibras de aço no CAA (ancorada, corrugada e reta) e verificou que, independentemente do tipo de fibra empregada, o aumento do teor de fibra no CAA gera perda da fluidez. Entretanto, quando analisadas as propriedades mecânicas do CAA, à medida que a quantidade de fibras foi incrementada, os valores de resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade também aumentaram.

Poveda et al. (2017) notaram que CAA com teores de fibras de aço, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% não influenciaram significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Ismail e Hassan (2017) avaliaram a resistência ao impacto e as propriedades mecânicas de várias misturas de concreto emborrachado autoadensável e reforçado com fibras de aço. Nesta pesquisa, as fibras de aço foram utilizadas para compensar a redução da resistência à tração e à flexão resultante da adição de grandes volumes de borracha, visando desenvolver concreto de baixa densidade com maior resistência ao impacto. Foram empregados teores de 0 a 40% de borracha em substituição ao volume de areia e diferentes frações volumétricas de fibras de aço (0%, 0,35%, 0,5%, 0,75% e 1%) para consumo de aglomerante de  $550 \text{ kg/m}^3$  e  $600 \text{ kg/m}^3$ . Na Tabela 18 estão indicados os valores referentes ao CAA com 0,35% de fibras de aço, que atingiram valor mínimo de 0,75 no ensaio da caixa L. Os resultados indicaram que a adição de borracha ao concreto melhorou a absorção de energia ao impacto e a ductilidade, enquanto as propriedades mecânicas diminuíram à medida que a porcentagem de borracha aumentou. O uso de fibras de aço aumentou a resistência ao impacto do CAA e compensou a redução da resistência à tração e à flexão resultante da adição de borracha. No entanto, foi o ensaio da caixa L que limitou o emprego de maiores teores de 0,35% de fibras. Como a habilidade passante não é um fator limitante para o concreto vibrado emborrachado, foi possível combinar volumes mais altos de borracha e fibras de aço na fabricação do concreto vibrado,

sendo possível obter maiores reduções no peso próprio e melhores valores nas propriedades de resistência à tração, ductilidade e resistência ao impacto.

No trabalho desenvolvido por Aslani e Kelin (2018) sobre CAA contendo borracha, escória e fibras expostos a diferentes temperaturas, notou-se que, com o aumento do teor de fibra de 0,25% a 1,00% em relação ao volume do CAA, houve uma queda na tralhabilidade do CAA. Quanto ao comportamento mecânico do CAA exposto à temperatura de 25°C, os pesquisadores constataram que a maior resistência à compressão se deu para o CAA com 0,75% de fibras de aço. Contudo, a maior resistência à tração foi apresentada para o teor de 0,25% de fibras, provavelmente devido à distribuição e orientação aleatória das fibras na mistura. E, quanto ao módulo de elasticidade verificou-se aumento desta propriedade para teores crescentes de fibras de aço no CAA.

Xie et al (2018) estudaram diversas composições de concreto contendo agregados reciclados de concreto, borracha e fibras de aço. Os maiores valores de resistência à compressão foram para os concretos contendo 10% de sílica ativa (Tabela 19). A resistência à compressão do concreto diminuiu acentuadamente com o aumento do teor de borracha, mas esse efeito negativo pode ser significativamente minimizado pela incorporação de sílica ativa para o teor de borracha inferior a 20%. Outro aspecto considerado foi que a incorporação de sílica ativa e agregados reciclados, compensou o aumento da emissão de CO<sub>2</sub> causada pela adição de borracha e fibra de aço. Assim os pesquisadores concluíram que o concreto contendo 10% de sílica ativa e 5% de borracha é uma alternativa mais ecológica ao concreto convencional para emprego em elementos submetidos à compressão em estruturas de concreto.

Alsaif et al. (2018) estudaram a incorporação de 20%, 40% e 60% de resíduos de borracha, em substituição ao volume de agregados, em concretos reforçado com fibras de aço (20 kg/m<sup>3</sup> e 40 kg/m<sup>3</sup>). Os autores observaram que ocorreu uma diminuição do abatimento, no estado fresco, devido a ação conjunta das fibras e dos resíduos de borracha. As propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão bem como o módulo de elasticidade) diminuíram com o aumento do teor de borracha. As fibras de aço na quantidade de 40 kg/m<sup>3</sup> melhoraram as propriedades mecânicas do concreto (em até 30% da resistência à compressão) e proporcionaram aumentos modestos no módulo da elasticidade (de 3%). A adição de fibras de aço ao concreto, compensou a perda de resistência do material pelo uso da borracha. A curva tensão deformação mostrou que a capacidade de tensão do concreto e a absorção de energia pós-pico, foram melhorados pela adição de fibras e pela inclusão da borracha, transformando completamente o desempenho à flexão do concreto com borracha permitindo-o resistir a cargas estruturais, indicando existir uma sinergia entre as fibras de aço e a borracha. Os pesquisadores

concluíram que o traço de concreto estudado, com 60% do volume de agregados em borracha e fibras combinadas ( $20 \text{ kg/m}^3$  do tipo manufaturada e  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço de pneu reciclado), foi adequado para aplicações em pavimento.

Gokulnath; Ramesh; Sivashankar (2020) desenvolveram um trabalho sobre CAA com fibras de aço, utilizando areia de rio e areia manufaturada. Os valores apresentados na Tabela 19 são referentes a areia de rio. Observa-se aumento da resistência à tração por compressão diametral com teores crescentes de fibras de aço no CAA e diminuição da resistência à tração na flexão.

No trabalho desenvolvido por Eisa; Elshazli; Nawar (2020) foram empregados teores de 5%, 10%, 15% e 20% de borracha em substituição parcial a massa da areia e fração volumétrica de fibras de aço de 1%. Na Tabela 19 estão os valores referentes aos concretos contendo fibras de aço. Os autores concluíram que: (a) a trabalhabilidade e a massa unitária do concreto diminuíram com o aumento da porcentagem de borracha. E, a incorporação de fibras de aço diminuiu a trabalhabilidade e aumentou a massa unitária do concreto; (b) a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de ruptura diminuíram com o aumento da porcentagem de borracha. No entanto, esse efeito negativo foi mitigado com o emprego das fibras de aço; (c) a adição de fibras de aço no concreto aumentou a resistência à compressão de 11% a 34%, a resistência à tração de 96% a 75% e o módulo de ruptura de 26% a 14%, quando a porcentagem de borracha variou entre 0% e 20%, respectivamente; (d) ao investigarem o comportamento estático de vigas de concreto armado, os resultados dos testes mostraram que o uso de 5% e 10% de borracha apresentaram um desempenho aceitável. E, a incorporação de fibras de aço em vigas de concreto armado aumentou sua ductilidade.

Encontra-se na literatura o avanço nas pesquisas relacionadas ao CAA. Verifica-se que o emprego de resíduos de mármore e granito, borracha, e fibras de aço agrega ao concreto as principais vantagens, tais como:

- densificação da pasta e melhora do empacotamento proporcionado pelos resíduos de mármore e granito (Taji et al., 2019);
- melhora da capacidade de dissipação de energia, aumentando o amortecimento do material pela adição de borracha (Li et al., 2019); e
- aumento da tenacidade do concreto devido a adição de fibras de aço (CUENCA; ECHEGARAY-OVIEDO; SERNA, 2015).

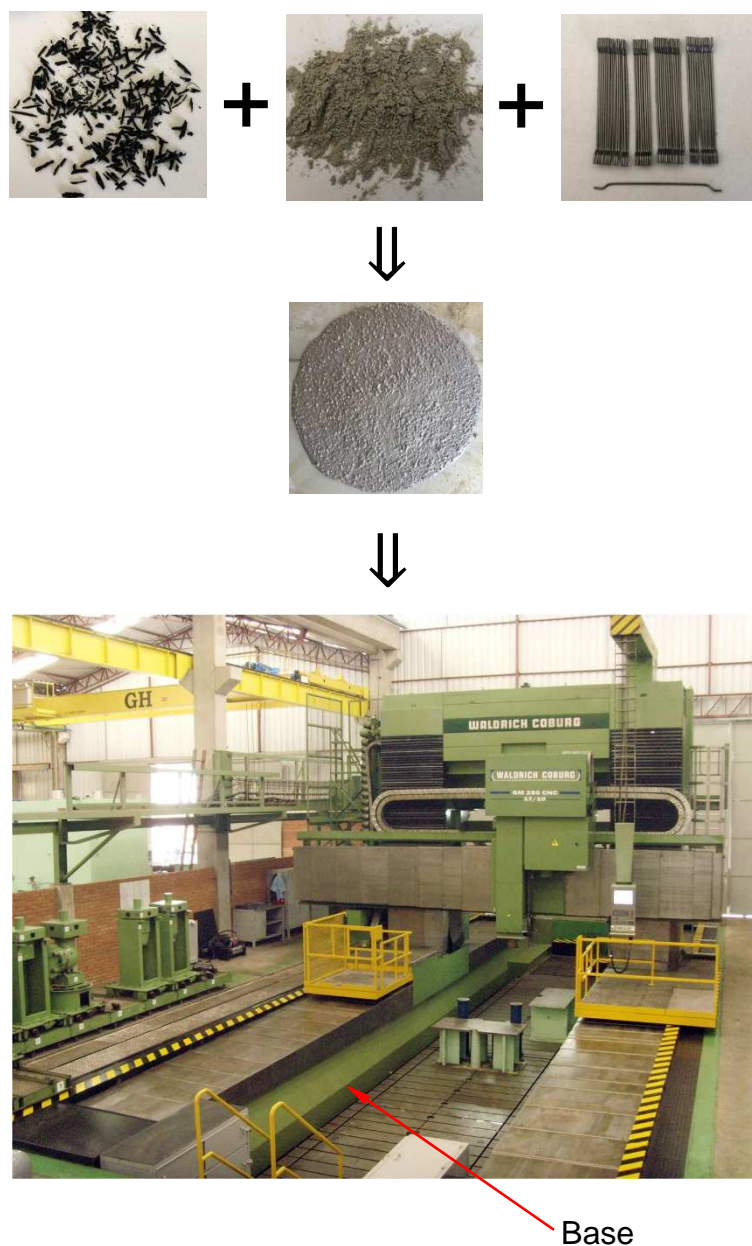
O estudo conjunto destes materiais (resíduos de mármore e granito, borracha e fibras de aço) na composição do CAA, visando sua aplicação na construção de bases de máquinas-



ferramenta é uma contribuição inédita. Na Figura 10 encontra-se uma possível aplicação para o CAA proposto nesta pesquisa.

Assim, esta pesquisa busca-se avaliar o comportamento do CAA composto por estes resíduos quanto as propriedades no estado fresco (como trabalhabilidade, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação) e no estado endurecido (como resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade estático e dinâmico, amortecimento).

Figura 10: Resíduos de borracha, mármore e granito e fibras de aço empregados na composição do CAA, para construção de bases de máquinas-ferramenta.



## CAPÍTULO 3 – PARTE EXPERIMENTAL

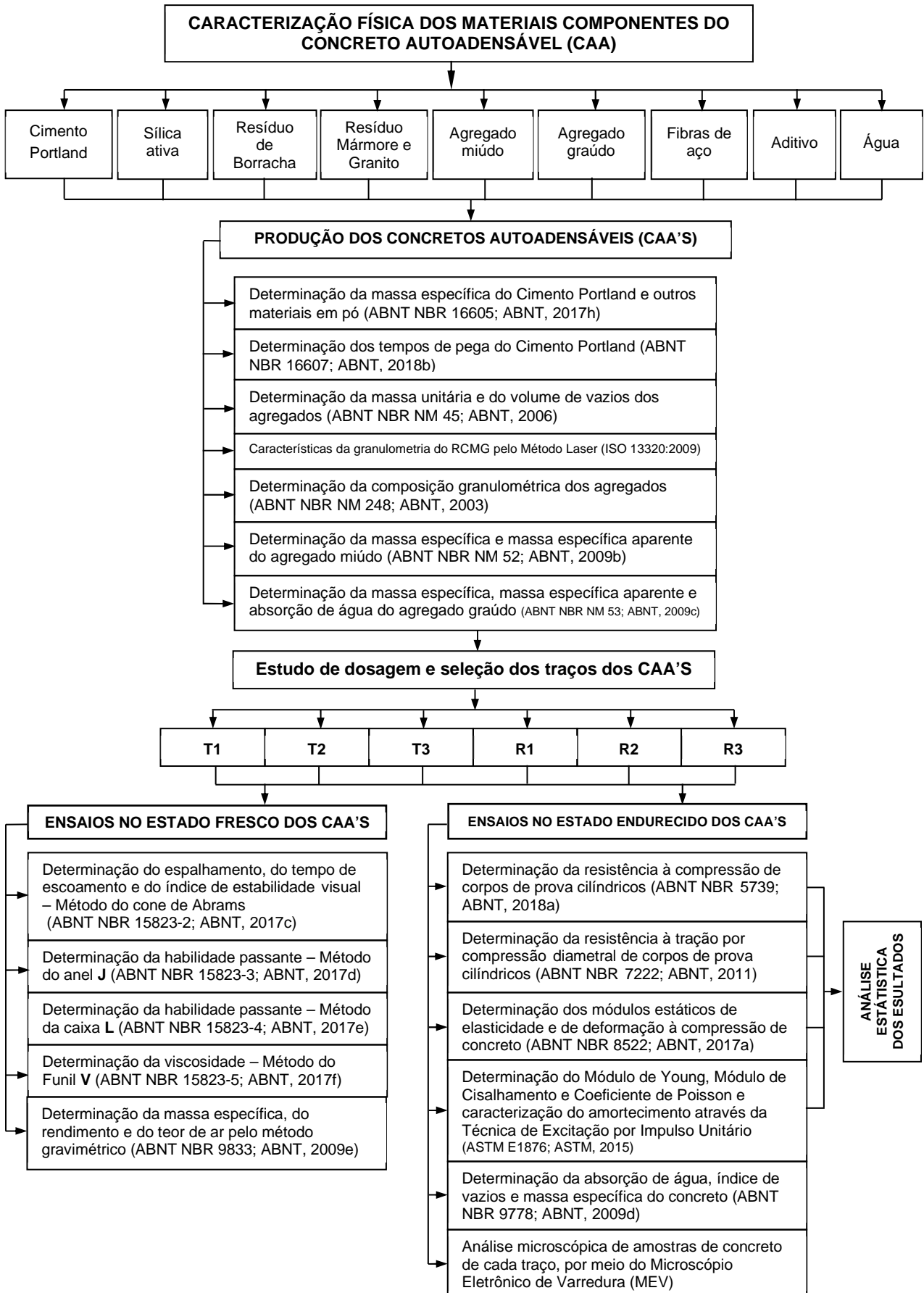
Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, na Figura 11 está o fluxograma com a sequência das etapas realizadas neste trabalho. A parte experimental foi executada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP e consiste em três etapas.

Na Etapa 1 foram realizadas as atividades: caracterização física dos materiais componentes do CAA, seleção dos traços, moldagem de corpos de prova de CAA com fibras de aço em três condições, sendo CAA sem resíduos, CAA com resíduos de pó de mármore e granito e CAA com resíduos de pó de mármore e granito e resíduos de borracha de pneu. Realização de ensaios do CAA no estado fresco: espalhamento,  $T_{500}$ , anel J, funil-V, caixa-L, determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.

Na Etapa 2 foram realizadas as atividades: ensaios do CAA no estado endurecido, com a determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto (ABNT NBR 9778; ABNT, 2009d), determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739; ABNT, 2018a), determinação da resistência à tração (ABNT NBR 7222; ABNT, 2011), determinação do módulo elástico estático (ABNT NBR 8522; ABNT, 2017a), módulo elástico dinâmico por meio da Técnica de Excitação por impulso e amortecimento, conforme ASTM C215 (ASTM, 2014) e ASTM E1876 (ASTM, 2015).

Na Etapa 3 foram realizadas as análises de microscopia por meio do MEV, para verificar o comportamento da microestrutura do CAA. Vale ressaltar que, com a incorporação da borracha no concreto, a microestrutura apresenta um maior número de vazios e, conseqüentemente, aumento do amortecimento e redução da resistência mecânica. Para mitigar essa perda de resistência mecânica, foram incorporados resíduos de mármore e granito, para densificar a pasta e aumentar o empacotamento da matriz do concreto.

Figura 11: Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

## **3.1 Materiais empregados na pesquisa**

### **3.1.1 Cimento**

O cimento utilizado nesta pesquisa foi do tipo CPV ARI (Alta Resistência Inicial) (ABNT NBR 16697; ABNT, 2018c). Este tipo de cimento foi selecionado pelas suas características de finura, provenientes da moagem do clínquer, que confere ao produto elevadas resistências aos 7 dias de idade. Dessa forma, é indicado para a produção de CAA, de pré-moldados e para a construção de elementos que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida (REPETTE, 2011).

O consumo de cimento indicado para a produção de CAA é de 350 a 450 kg/m<sup>3</sup>, pois consumos maiores podem causar o efeito da retração (EFNARC, 2005; REPETTE, 2011). Nesta pesquisa, empregou-se consumo de cimento de 345 a 366 kg/m<sup>3</sup>.

Para a determinação da massa específica do cimento utilizou-se a ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017h) e, para a determinação da massa unitária no estado solto, a ABNT NBR 45 (ABNT, 2006). Os tempos de pega foram determinados segundo a ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018b).

### **3.1.2 Sílica ativa**

A sílica ativa foi a adição mineral utilizada na fabricação dos CAA, segundo a EFNARC (2005). A sílica ativa, na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente produzindo compostos com propriedades cimentícias. As alterações físicas decorrentes desta reação pozolânica são: efeitos microfíler e refinamento dos poros, resultando no aumento da massa específica do concreto e no preenchimento de espaços vazios (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Suas características físicas e químicas são:

- Massa específica (ABNT NBR 16605; ABNT, 2017h) de 2,21 kg/dm<sup>3</sup>;
- Formato da partícula: esférico; e
- Teor de SiO<sub>2</sub> > 85%.

### 3.1.3 Resíduos de Corte de Mármore e Granito

Os RCMG foram empregados na produção dos CAA na forma de finos, uma vez que estes concretos requerem características especiais de fluidez e necessitam de materiais finos em sua composição. Na Figura 12 está o RCMG utilizado nesta pesquisa. O resíduo foi coletado em uma empresa localizada no Município de Limeira-SP, na forma de lama, e transportado para o Laboratório de Materiais de Construção Civil da FT-UNICAMP em bombonas de 30 litros. O material foi seco em estufa à temperatura de 100 ( $\pm 5$ )°C durante 24 horas, em seguida foi destorroado e, posteriormente, foi separado por meio de peneiramento utilizando-se peneiras de malha quadrada de 600  $\mu\text{m}$  e estocado em bombonas de 30 litros.

O RCMG foi caracterizado quanto à massa específica de acordo com a ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017h) e quanto ao índice de finura conforme a ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012). O ensaio para a determinação da composição granulométrica do RCMG foi realizado pelo Método a Laser (ISO 13320:2009), utilizando-se o granulômetro a laser Helos (Sympatec) do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME) da USP. O ensaio foi executado da seguinte forma: 0,15 g do resíduo foi colocado em béquer e, em seguida, misturado com 50 ml de água, utilizando-se um misturador de bancada RW20 (Ika) com rotação mantida em 1000 rpm durante um minuto. A suspensão foi transferida para o reservatório de análise, aplicado ultrassom por dois minutos e registrados os resultados.

Figura 12: Resíduo de mármore e granito empregado nesta pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

### **3.1.4 Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa, proveniente da região de Corumbataí-SP. As características físicas do agregado miúdo foram determinadas segundo as especificações da ABNT, conforme explanado a seguir.

Para a realização dos ensaios, o agregado miúdo foi coletado e separado conforme as especificações da ABNT NBR NM 26 (ABNT, 2009a) e ABNT NBR NM 27 (ABNT, 2001a). Na sequência, as amostras foram secadas em estufa, deixadas esfriar à temperatura ambiente e realizados os seguintes ensaios:

- Determinação da composição granulométrica dos agregados (ABNT NBR NM 248; ABNT, 2003);
- Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT NBR NM 52; ABNT, 2009b); e
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados (ABNT NBR NM 45; ABNT, 2006).

### **3.1.5 Agregado graúdo**

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica, proveniente da região de Limeira-SP. Para a realização dos ensaios de caracterização física o agregado graúdo foi coletado e separado conforme as especificações da ABNT NBR NM 26 (ABNT, 2009a) e ABNT NBR NM 27 (ABNT, 2001a). Na sequência, as amostras foram secadas em estufa, deixadas esfriar à temperatura ambiente e realizados os ensaios:

- Determinação da composição granulométrica dos agregados (ABNT NBR NM 248; ABNT, 2003);
- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT NBR NM 53; ABNT, 2009c); e
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados (ABNT NBR NM 45; ABNT, 2006).

### 3.1.6 Resíduos de Borracha

Os resíduos de borracha empregados são provenientes da indústria de recauchutagem de pneus localizada na região de Limeira. Os resíduos de borracha, mostrados na Figura 13, são obtidos em diferentes granulometrias, por processo de raspagem mecânica. O material empregado passou pela peneira de malha quadrada 1,2 mm e ficou retido na peneira de malha quadrada 0,6 mm.

Figura 13: Resíduo de borracha empregado na produção do CAA.



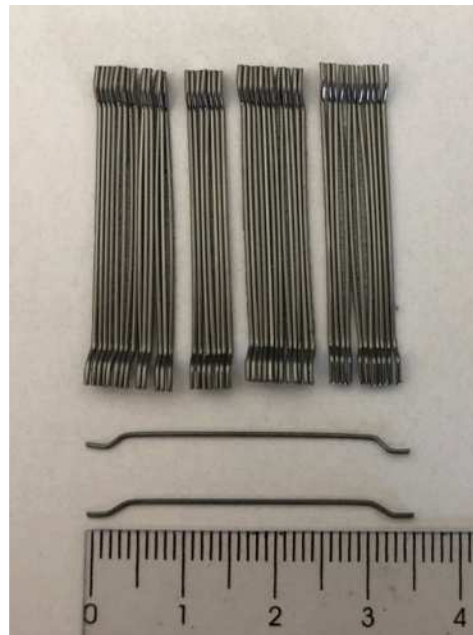
Fonte: Próprio autor.

### 3.1.7 Fibra

A fibra de aço utilizada, mostrada na Figura 14, possui as seguintes características, segundo o fabricante:

- Comprimento: 35 mm
- Diâmetro: 0,55 mm
- Fator de forma: 65
- Módulo de elasticidade: 200.000 N/mm<sup>2</sup>
- Resistência à tração: 1.345 N/mm<sup>2</sup>
- Quantidade de fibras/kg: 14.711

Figura 14: Fibras de aço com ganchos nas extremidades empregada para a produção dos CAA.



Fonte: Próprio autor.

Optou-se pelo emprego deste tipo de fibra, devido a sua melhor eficiência no concreto, que ocorre quando o comprimento mínimo da fibra é igual ou maior que dobro do diâmetro máximo do agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2011).

### 3.1.8 Aditivo

O aditivo empregado na pesquisa é, a base de éter policarboxilato, do tipo plastificante multifuncional “*mid-range*” de pega normal, cujas características são fornecidas pelo fabricante e constam da Tabela 20. Este aditivo foi empregado para aumentar a fluidez das misturas de CAA.

Tabela 20: Características do aditivo usado para a produção do CAA.

Propriedades e Características	Aditivo
massa específica	1,08 g/cm <sup>3</sup>
pH	7,7
estado	líquido
cor	marrom
dosagem	0,2 a 2,0% sobre a massa do cimento

Fonte: Ficha técnica do produto disponibilizada pelo fabricante - <https://www.mc-bauchemie.com.br>. Acesso em 20/03/2019.



### 3.2 Produção dos CAA

A seleção dos traços foi baseada no estudo de dosagem a partir dos trabalhos desenvolvidos por Gomes e Barros (2009), Repette (2011), Tutikian e Dal Molin (2015), Verzegnassi (2015), Xavier et al. (2018) e Xavier (2019). No Laboratório de Materiais de Construção Civil da FT-UNICAMP foram realizados alguns ensaios preliminares e definidos os traços empregados nesta pesquisa.

Na Tabela 21 estão os traços em massa dos CAA estudados. Nos traços T1, T2, T3 foi empregado 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço e nos traços R1, R2, R3 foi utilizado 10 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 21: Traços, em massa, dos CAA estudados nesta pesquisa.

Traço	cimento	sílica	areia	borracha	pó de mármore (RCMG)	pedrisco	fibras de aço	aditivo	a/c	consumo cimento kg/m <sup>3</sup>	teor de argamassa
<b>T1</b>	1	0,10	2,83	0	0	2,08	0,052	0,02	0,58	365	0,64
<b>T2</b>	1	0,10	2,83	0	0,30**	2,08	0,052	0,02	0,58	350	0,66
<b>T3</b>	1	0,10	2,83	0,05**	0,30**	2,08	0,052	0,02	0,58	345	0,66
<b>R1</b>	1	0,10	2,83	0	0	2,08	0,026	0,02	0,58	366	0,64
<b>R2</b>	1	0,10	2,52	0	0,30*	2,08	0,026	0,02	0,58	366	0,64
<b>R3</b>	1	0,10	2,47	0,025*	0,30*	2,08	0,026	0,02	0,58	366	0,64

\*subtraíu da massa de areia

\*\*acrescentou na mistura

Fonte: Próprio autor.

O RCMG foi empregado com o propósito de aumentar a quantidade de finos na pasta do CAA.

A etapa de mistura dos concretos foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade para 120 litros, em temperatura ambiente de aproximadamente 20° C (± 5)°C. A etapa da moldagem, mostrada na Figura 15, foi realizada por meio da colocação dos concretos nos moldes metálicos, os quais se auto adensaram. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e, em seguida, submetidos ao processo de cura úmida, à temperatura de 23°C (±2)°C e umidade relativa do ar acima de 95%. Os corpos de prova permaneceram em cura até

a data da realização dos ensaios, aos 7 e 28 dias após a moldagem, conforme ABNT NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 15: Etapa de moldagem do CAA. (a) Material pesado para cada traço. (b, c) Mistura na betoneira. d) Corpos de prova de CAA produzidos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Ensaio realizado no estado fresco e endurecido dos concretos autoadensáveis

#### 3.3.1 Ensaio no estado fresco dos concretos autoadensáveis

O ensaio de espalhamento foi realizado para medir a fluidez do concreto autoadensável, utilizando-se o cone de Abrams, segundo as especificações da ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c). Neste mesmo ensaio determinou-se:

- o espalhamento (SF) do concreto sobre a placa-base, obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro, em milímetros;

- o tempo de escoamento ( $t_{500}$ ) que corresponde ao intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm) até a marca circular de diâmetro 500 mm da placa-base; e
- o índice de estabilidade visual (IEV) determinado visualmente pela análise do concreto após o término do escoamento sobre a placa-base.

Para determinar a habilidade passante foi realizado o ensaio utilizando-se o anel J, segundo ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c). O ensaio para verificar a habilidade passante do material pela caixa L foi executado conforme ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e). Para avaliar a viscosidade do concreto pelo funil V, foi realizado o ensaio de acordo com ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f).

A determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico foi realizada segundo a ABNT NBR 9833 (ABNT, 2009e). Neste ensaio a massa específica é definida como massa da unidade de volume do concreto fresco adensado, incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado, subtraindo-se a massa do recipiente vazio da massa total obtida, sendo calculada como (Equação 3.1):

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (3.1)$$

onde:

$\rho_{ap}$  - massa específica aparente do concreto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$m$  - massa de concreto (kg)

$V$  - volume do recipiente ( $\text{dm}^3$ )

O rendimento é definido como o volume resultante da mistura fresca adensada e é calculado pela Equação (3.2):

$$R = \frac{mc + mf + mg + ma}{\rho_{ap}} \quad (3.2)$$

onde:

$R$  - rendimento ( $\text{m}^3$ )

$mc$  - massa de cimento da betonada (kg)

$mf$  - massa total de agregado miúdo da betonada, na condição de umidade em que foi utilizado para o preparo do concreto (kg)

$mg$  - massa total de agregado graúdo da betonada, na condição de umidade em que foi utilizado para o preparo do concreto (kg)

$ma$  - massa total de água adicionada na betonada (kg)

$\rho_p$  - massa específica aparente do concreto ( $\text{kg/m}^3$ )

O consumo de cimento do concreto é calculado conforme Equação (3.3):

$$C = \frac{mc}{R} \quad (3.3)$$

onde:

$C$  - consumo de cimento do concreto ( $\text{kg/m}^3$ )

$mc$  - massa de cimento da betonada (kg)

$R$  - rendimento do concreto ( $\text{m}^3$ )

Posteriormente, calcula-se o volume total dos componentes da betonada (3.4), o índice de ar (3.5) e o teor de ar (3.6).

$$V_t = \frac{mc}{\rho_c} + \frac{mf}{\rho_f} + \frac{mg}{\rho_g} + \frac{ma}{\rho_a} \quad (3.4)$$

onde:

$V_t$  - volume total dos componentes da betonada ( $\text{m}^3$ )

$\rho_c$  - massa específica do cimento ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_f$  - massa específica do agregado miúdo ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_g$  - massa específica do agregado graúdo ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_a$  - massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$mc$  - massa do cimento (kg)

$mf$  - massa do agregado miúdo (kg)

$mg$  - massa do agregado graúdo (kg)

$ma$  - massa da água (kg)

$$I_a = \frac{R}{V_t} \quad (3.5)$$

onde:

$I_a$  - índice de ar presente na mistura

$V_t$  - volume total dos componentes da betonada ( $\text{m}^3$ )

$R$  - rendimento ( $\text{m}^3$ )

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) \times 100 \quad (3.6)$$

onde:

A - teor de ar do concreto (%)

$I_a$  - índice de ar presente na mistura

### 3.3.2 Ensaio no estado endurecido dos concretos autoadensáveis

#### 3.3.2.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão

A determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão foi realizada segundo ABNT NBR 9778 (ABNT, 2009d), ensaiando-se 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, aos 28 dias de idade, para cada traço de CAA.

Inicialmente, os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de  $105 (\pm 5)^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas e foi registrado o valor da massa seca ( $m_s$ ). Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de  $23 (\pm 2)^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas. Na sequência, foram levados à ebulição por um período de 5 horas. Após a água esfriar até a temperatura de  $23 (\pm 2)^\circ\text{C}$ , foi registrada a massa imersa ( $m_i$ ) com auxílio da balança hidrostática. Os corpos de prova foram retirados da água, enxutos com pano úmido e foi registrada a massa saturada ( $m_{sat}$ ).

Foram calculados a absorção (A), índice de vazios ( $I_v$ ) e massa específica seca ( $\rho_s$ ), saturada ( $\rho_{sat}$ ) e real ( $\rho_r$ ), por meio das expressões (3.7) a (3.11):

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.7)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.8)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.9)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (3.10)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3.11)$$

onde:

$m_{sat}$  = massa saturada

$m_s$  = massa seca em estufa

$m_i$  = massa imersa em água

### 3.3.2.2 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP em máquina universal de ensaios modelo EMIC 23-600, da marca INSTRON/EMIC, com capacidade de carga de 600 kN, eletromecânica, microprocessada, com atuador externo adicional, acoplado, com 2000 kN, mostrada na Figura 16, além dos equipamentos auxiliares para a aquisição de dados.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado utilizando-se 7 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, aos 7 e 28 dias de idade, para cada traço de CAA, segundo ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018a), com o propósito de garantir a reprodutibilidade para cada um dos traços de CAA.

O ensaio de resistência à tração foi realizado utilizando-se 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, aos 7 e 28 dias de idade, para cada traço de CAA, segundo ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 16: Execução do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2.3 Módulo de elasticidade estático

O ensaio de módulo de elasticidade estático foi executado utilizando-se 6 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, aos 7 e 28 dias de idade, para cada traço de CAA, segundo ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017a) e mostrado na Figura 17. Os ensaios foram realizados na Prensa Universal modelo EMIC 23-600 da marca INSTRON/EMIC, com capacidade de carga de 600kN.

Figura 17: Execução do ensaio de módulo de elasticidade estático.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento

Nesta pesquisa utilizou-se o equipamento Sonelastic® para a realização dos ensaios não destrutivos. O equipamento Sonelastic®, desenvolvido pela ATCP Engenharia Física utiliza a TEI, que por intermédio de um sensor acústico capta o som das frequências de ressonâncias fundamentais emitido por um corpo de prova de geometria regular (barra retangular, cilindro, disco ou anel) através da sua resposta acústica ao se aplicar um impacto mecânico de curta duração. O espectro de frequências é obtido através da aplicação de um recurso matemático, a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Dessa forma, por meio de procedimentos computacionais, é possível obter os módulos elásticos e fatores de amortecimento. Esta resposta acústica transitória constituída pelas frequências naturais de vibração em conjunto com as dimensões, massa e geometria do material, são proporcionais as principais propriedades

elásticas (módulo elasticidade ou módulo de Young, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson) e apresenta uma taxa de atenuação que é proporcional ao amortecimento (OTANI e PEREIRA, 2017).

Os modos de vibração flexional, longitudinal e torcional determinam os módulos de elasticidade dinâmicos (flexional e longitudinal) e o módulo de cisalhamento dinâmico respectivamente.

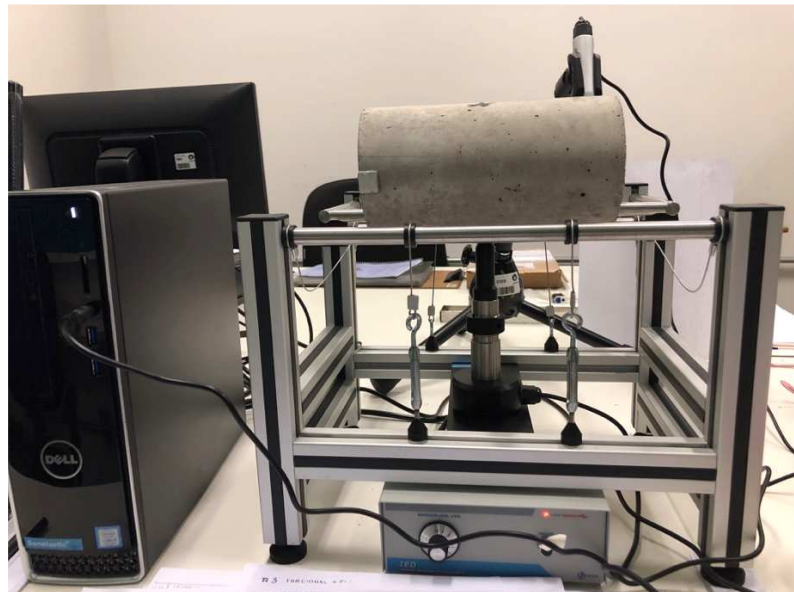
Os ensaios realizados com o Sonelastic® seguem as principais diretrizes especificadas nas normas ASTM C215 (ASTM, 2014) e ASTM E1876 (ASTM, 2015) para a determinação das propriedades elásticas em barras prismáticas de concreto.

Para a realização deste ensaio foram utilizados 6 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para cada traço. A balança utilizada para a pesagem dos corpos de prova cilíndricos foi a Balança Marte de modelo AS 5500C que possui precisão de 0,01g. Na Figura 18 está a realização do ensaio.

Figura 18: (a) Medida da massa da amostra; (b) Realização de ensaio dinâmico por estímulo por impulso.



(a)



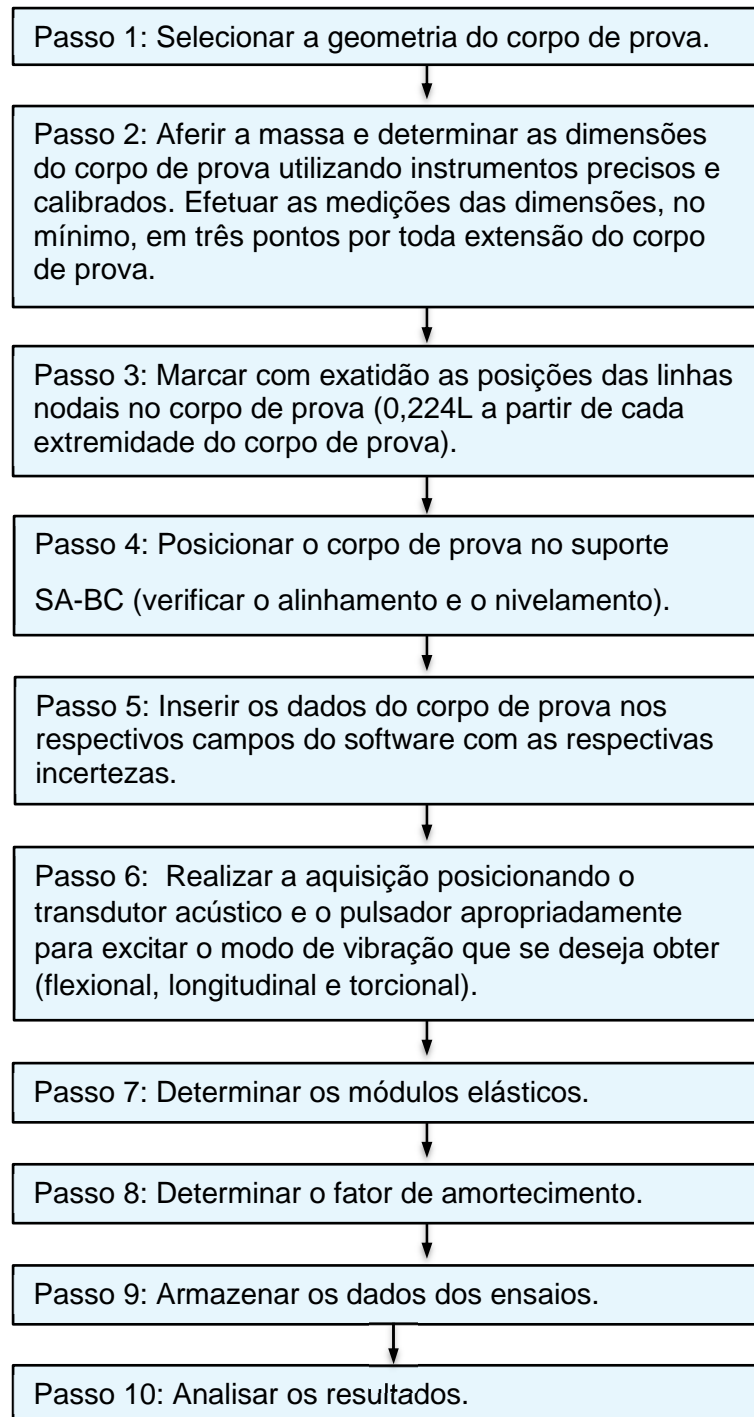
(b)

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 19 está o fluxograma que apresenta os passos para a estimativa dos módulos de elasticidade dinâmicos e razões de amortecimentos obtidos pela TEI utilizando o equipamento Sonelastic® (OTANI e PEREIRA, 2017).



Figura 19: Etapas para determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos e razões de amortecimentos obtidos pela técnica de Excitação por Impulso.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2.5 Análise da microestrutura dos concretos autoadensáveis

A estrutura interna dos concretos autoadensáveis foi analisada no Departamento de Geologia e Recursos Naturais do Instituto de Geociências da UNICAMP, utilizando-se o MEV.

As amostras para o ensaio foram retiradas de corpos de prova de CAA ensaiados à compressão, aos 28 dias. Estas amostras foram submetidas ao processo de metalização, recebendo sobre suas superfícies uma fina camada de carbono, a fim de melhorar o contraste das imagens. Foi utilizado o pulverizador Q150T ES, da marca QUORUM.

Na sequência as amostras foram metalizadas e analisadas por meio do MEV LEO 430i, com varredura, fabricado pela Zeiss (acoplado a ele há um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da Oxford Instruments para análises semi-quantitativas). As condições de operação foram: energia do feixe de elétrons: 20 kV, corrente do feixe: entre 500 pA (imagens) e 6000 pA (microanálise) e distância de trabalho: 19 mm. Na Figura 20 estão apresentados os equipamentos utilizados.

Figura 20: (a) Metalizadora; (b) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Próprio autor.

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

São apresentados, nesta seção, os resultados dos seguintes ensaios:

- caracterização física dos materiais componentes dos CAA;
- ensaios no estado fresco dos CAA: espalhamento,  $T_{500}$ , anel J, funil-V, caixa-L, determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico; e
- ensaios no estado endurecido dos CAA: determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto, resistência à compressão, resistência à tração, módulo elástico estático, módulo elástico dinâmico e amortecimento e análise da microestrutura.

### **4.1 Resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais**

#### **4.1.1 Cimento**

O cimento utilizado nesta pesquisa é do tipo CPV. A massa específica deste cimento é de  $3,08 \text{ kg/dm}^3$  (ABNT NBR 16605; ABNT, 2017h) e a massa unitária no estado solto é de  $1,03 \text{ kg/dm}^3$  (ABNT NBR 45; ABNT, 2006). Os tempos de pega, segundo ABNT NBR 16607; ABNT, 2018b), são:

- Início de pega: 130 min; e
- Fim de pega: 210 min.

#### **4.1.2 Resíduos de Corte de Mármore e Granito (RCMG)**

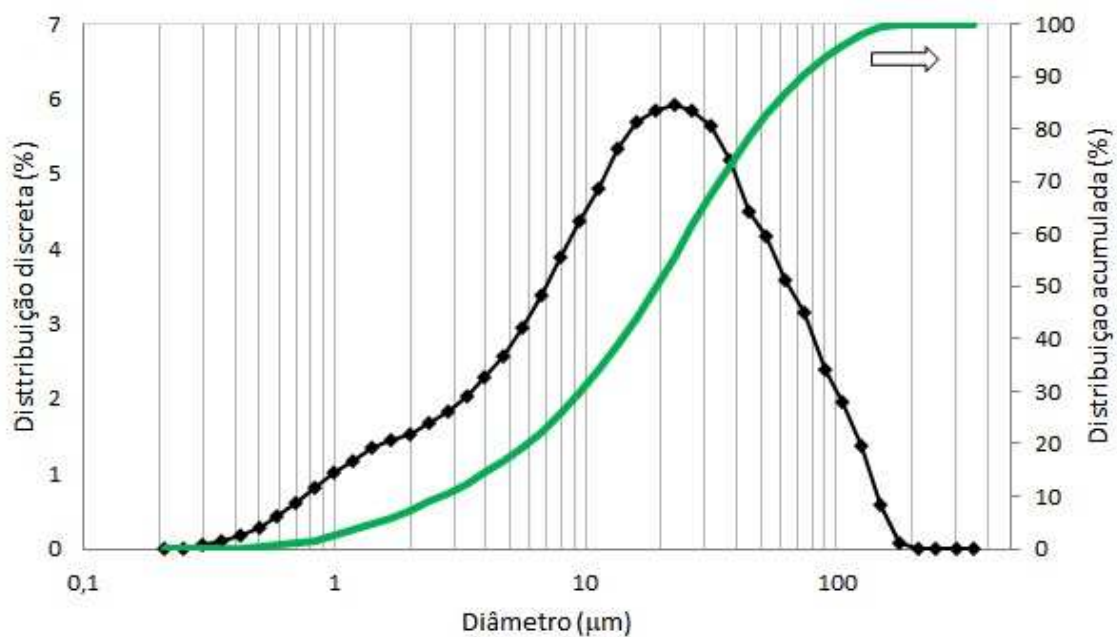
A massa específica do RCMG é  $2,58 \text{ g/cm}^3$  e o índice de finura é 10,28%. O ensaio para a determinação da composição granulométrica do RCMG foi realizado pelo Método Laser (ISO 13320; ISO, 2009). A distribuição de tamanho de partículas discreta e acumulada é apresentada na Figura 21. Trata-se de uma distribuição aberta de partículas com grãos variando

de 0,3  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ . A tabela 22 ilustra os diâmetros característicos dos grãos. Os dados complementares são apresentados no anexo A.

Tabela 22: Diâmetros característicos das partículas.

D10	2,64 $\mu\text{m}$
D50	19,04 $\mu\text{m}$
D90	73,37 $\mu\text{m}$

Figura 21: Distribuição de tamanho de partículas do RCMG.



### 4.1.3 Agregado miúdo

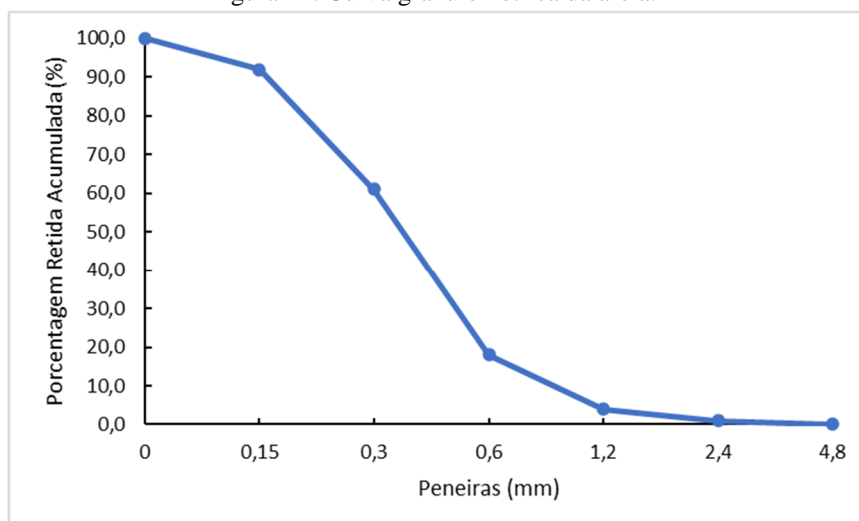
Na Tabela 23 e na Figura 22 estão os resultados do ensaio de granulometria segundo ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003). As demais características físicas como massa específica (ABNT NBR NM 52; ABNT, 2009b), massa unitária (ABNT NBR NM 45; ABNT, 2006) e absorção de água (ABNT NBR NM 30; ABNT, 2001b) estão na Tabela 24.

Tabela 23: Resultados do ensaio de granulometria da areia.

Peneiras (mm)	Porcentagens Retidas	
	Individuais (%)	Acumuladas (%)
4,8	0	0
2,4	1	1
1,2	3	4
0,6	13	18
0,3	44	61
0,15	31	92
< 0,15	8	100
Dimensão Máxima Característica		1,2 mm
Módulo de Finura		1,76
Classificação do agregado		Zona utilizável inferior

Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Curva granulométrica da areia.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 24: Características físicas da areia.

Caracterização física	Resultados
Massa específica	2,65 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	1,50 g/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,21%

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.4 Agregado graúdo

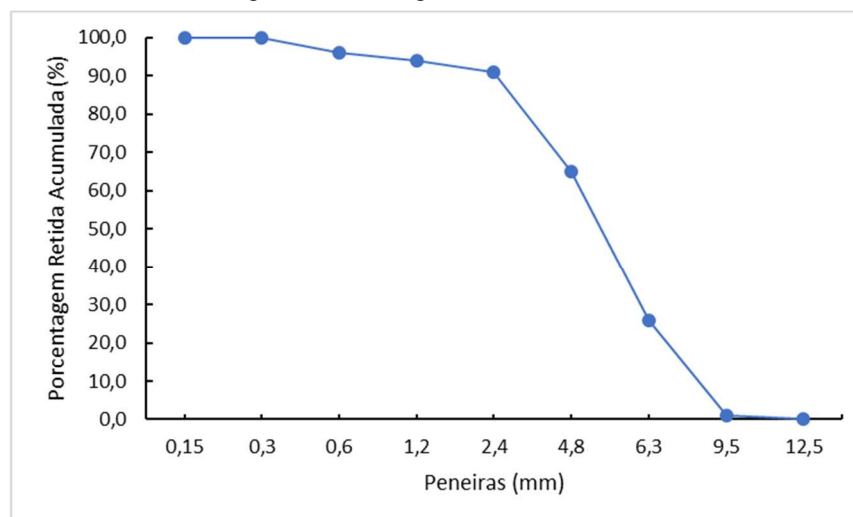
Na Tabela 25 e na Figura 23 estão os resultados do ensaio de granulometria segundo ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003). As demais características físicas como massa específica, absorção de água (ABNT NBR NM 53; ABNT, 2009c), massa unitária (ABNT NBR NM 45; ABNT, 2006) e estão na Tabela 26.

Tabela 25: Resultados do ensaio de granulometria da brita.

Peneiras (mm)	Porcentagens Retidas	
	Individuais (%)	Acumuladas (%)
12,5*	0	0
9,5	1	1
6,3*	25	26
4,8	39	65
2,4	26	91
1,2	4	94
0,6	1	96
0,3	4	100
0,15	0	100
<b>Dimensão Máxima Característica</b>		<b>9,5 mm</b>
<b>Módulo de Finura</b>		<b>5,47</b>
<b>Classificação do agregado</b>		<b>Zona 4,75/12,5</b>

Fonte: Próprio autor.

Figura 23: Curva granulométrica da brita.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 26: Características físicas da brita.

Caracterização física	Resultados
Massa específica	3,01 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	1,51 g/m <sup>3</sup>
Absorção de água	1,40%

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.5 Resíduos de Borracha

O material empregado passou pela peneira de malha quadrada 1,2 mm e ficou retido na peneira de malha quadrada 0,6 mm. As características físicas da borracha são:

- massa específica do resíduo de borracha de  $1,16 \text{ g/cm}^3$  (ABNT NBR NM 23; ABNT, 2000); e
- massa unitária do resíduo de borracha de  $0,39 \text{ g/cm}^3$  (ABNT NBR NM 45; ABNT, 2006).

Na Tabela 27 estão os dados dos elementos químicos presentes na estrutura da borracha, obtidos por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Tabela 27: Análise química da borracha, obtida por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

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

A análise para a classificação da borracha de pneu inservível quanto aos seus potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, conforme a série de normas acerca da classificação quanto à periculosidade (ABNT NBR 10004; ABNT, 2004a), foi realizada em Laboratório especializado, situado em Piracicaba/SP, acreditado pelo INMETRO. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30.

Tabela 28: Massa bruta, segundo a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a), da borracha de pneu inservível.

Parâmetro	Unidade	LQ*	Resultados analíticos	VMP**
pH (suspensão 1:1)	-	0 - 14	8,40	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto ( $\text{H}_2\text{S}$ )	mg/kg	1	< 1	500 (c)
% de sólidos	% p/p	0,05	99,2	-
Cianeto (HCN)	mg/kg	0,10	0,40	250 (c)

\* limite de quantificação da amostra

\*\* valores máximos permitidos pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a)

(b) avaliação da corrosividade

(c) avaliação da reatividade

Tabela 29: Ensaio de lixiviação ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004b) – Parâmetros inorgânicos da borracha de pneu inservível.

Parâmetro	Unidade	LQ*	Resultados analíticos	VMP**
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,037	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150,0
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,000075	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0

\* limite de quantificação da amostra

\*\* valores máximos permitidos pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a)

Tabela 30: Ensaio de solubilização ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c) – Parâmetros inorgânicos da borracha de pneu inservível.

Parâmetro	Unidade	LQ*	Resultados analíticos	VMP**
Alumínio	mg/L	0,01	0,170	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,063	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	0,5	7,7	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,085	0,3
Fluoreto	mg/L	0,05	0,5	1,5
Índice de fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,019	0,1
Nitrato	mg/L	0,1	< 0,1	10
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	8,2	200
Surfactantes	mg/L	0,1	0,18	0,5
Zinco	mg/L	0,01	8,1	5,0
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,000075	0,001
Sulfato	mg/L	0,5	3,2	250

\* limite de quantificação da amostra

\*\* valores máximos permitidos pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a)



A borracha de pneu inservível foi classificada como resíduo não perigoso e não inerte, Classe IIA. Nenhum dos parâmetros, tanto da massa bruta como de lixiviados, ficaram acima dos valores máximos permitidos pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a). Entretanto, nos resultados obtidos no ensaio de solubilização, o parâmetro zinco ultrapassa o limite máximo permitido pela norma, fato também observado na análise de EDS, classificando a borracha na Classe II A – Resíduo Não Inerte.

## 4.2 Resultados provenientes dos ensaios do CAA no estado fresco

Na Tabela 31 estão os resultados dos ensaios no estado fresco dos concretos autoadensáveis produzidos nesta pesquisa. No anexo A estão os registros dos ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

Tabela 31: Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco.

<b>Teor de resíduos nos traços dos concretos</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
RCMG (%)	0	30	30	0	30	30
Borracha (%)	0	0	5	0	0	2,5
<b>Espalhamento (mm)</b>						
<b>ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)</b>						
SF 1 – 550 a 650mm	735,0	725,0	595,0	730,0	837,5	725,0
SF 2 – 660 a 750mm						
SF 3 – 760 a 850 mm						
<b>T<sub>500</sub> (s)</b>						
<b>ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)</b>						
VS 1 ≤ 2s	1,00	2,00	3,00	1,10	1,86	1,40
VS 2 > 2s						
<b>IEV*</b>						
<b>ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c)</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Anel J (mm)</b>						
<b>ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017d)</b>						
PJ 1 – 0 a 25mm	17,50	15,75	6,25	20,00	25,00	5,50
PJ 2 – 25 a 50mm						
<b>Caixa L – HP</b>						
<b>ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017e)</b>	0,63	0,74	0,53	0,80	0,90	0,90
PL2 ≥ 0,80, com três barras de aço						
<b>Funil V (s)</b>						
<b>ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017f)</b>						
VF 1 ≤ 8	8,00	4,10	8,00	3,10	3,18	4,20
VF 2 – 9 a 25s						

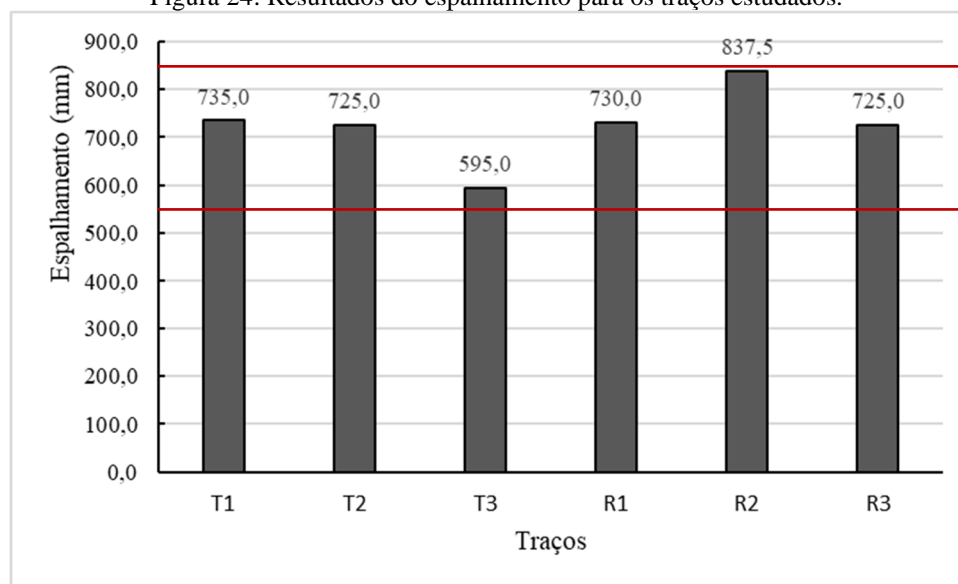
\*O índice de estabilidade visual (IEV) é determinado após o término da medida do escoamento. A Classe “IEV 0” significa que a mistura é altamente estável, sem evidência de segregação ou exsudação.

Fonte: Próprio autor.

### 4.2.1 Ensaio de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual

Os resultados do ensaio de espalhamento estão explicitados na Figura 24. Na Tabela 32 mostram-se as classificações dos traços dos CAA no estado fresco, segundo a ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).

Figura 24: Resultados do espalhamento para os traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 32: Classificação dos traços de acordo com as classes de espalhamento.

Classe	Espalhamento (mm)	T1	T2	T3	R1	R2	R3
SF 1	550 a 650			X			
SF 2	660 a 750	X	X		X		X
SF 3	760 a 850					X	

Fonte: Próprio autor.

Todos CAA produzidos estão dentro dos limites das especificações brasileiras da ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b), em que o limite mínimo é de 550 mm e o máximo é de 850 mm. Os traços R1, R2 e R3 possuem consumo de cimento de  $366 \text{ kg/m}^3$ . Os traços T1, T2 e T3 possuem teores de cimento de 365, 350 e  $345 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente.

Comparando-se os traços com resíduos de mármore e granito T2 e R2, verifica-se maior fluidez para R2. O traço R2, além de apresentar maior consumo de cimento que o T2, apresenta menor teor de fibras de aço. Com relação aos traços com resíduos de borracha e de mármore e granito T3 e R3, verifica-se uma diminuição do valor do espalhamento em relação às misturas T1, T2 e R1, R2, respectivamente. Estas misturas também apresentaram maior

coesão e ótima habilidade passante. Este fato foi confirmado por Angelin et al. (2018) que estudaram CAA com sílica ativa, argila expandida e resíduos de borracha em substituição ao agregado miúdo nas porcentagens de 5 e 10, e verificaram que o espalhamento apresentou uma queda nas misturas com borracha, atingindo o valor de 550 mm. Aslani et al. (2018a) também observaram diminuição no valor do espalhamento de misturas com resíduos de borracha.

Quanto ao índice de estabilidade visual, determinado visualmente, observou-se que as misturas não apresentaram evidências de segregação ou exsudação, podendo ser classificadas como IEV 0.

A análise do espalhamento do CAA com resíduos de mármore e granito também foi investigada por diversos pesquisadores, mostrada na Tabela 33, e os resultados assemelham-se aos encontrados nesta pesquisa.

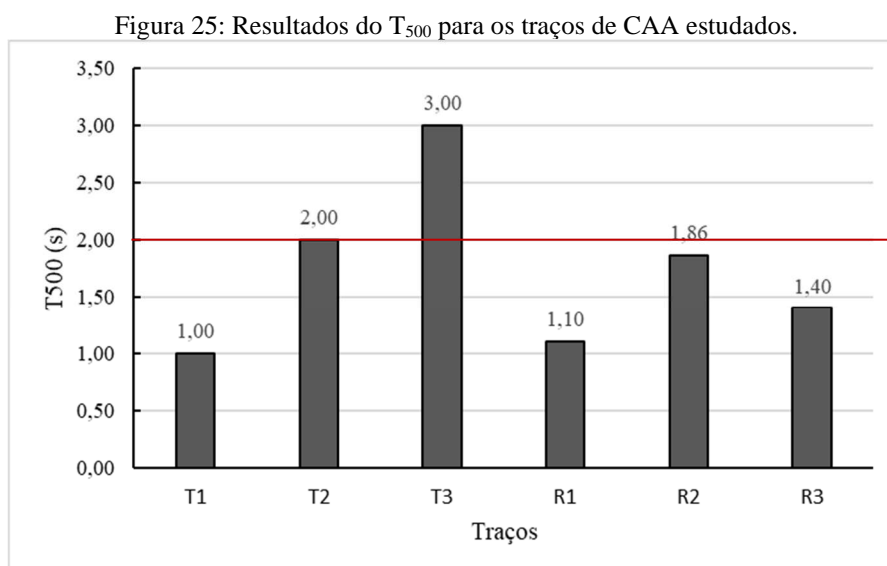
Tabela 33: Resultados de pesquisas referentes ao ensaio de espalhamento.

<b>Pesquisas</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>teor de mármore (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>	<b>Classificação</b>
Lisbôa (2004)	415 421	208 211	690 770	SF2 SF3
Topçu; Bilir; Uygunoğlu (2009)	495 a 315	0 a 200	810 a 680	SF3 / SF2
Gesoglu et al. (2012)	416	até 104	650 a 700	SF2
Manikandan e Felixkala (2015)	343	175,25	657	SF1
Boukhelkhal et al. (2016)	376	94	735	SF2
Hameed et al. (2016)	500 a 400	0 a 100	670 a 540	SF2 / SF1
Sadek; El-Attar; Ali (2016)	400	200	740	SF2
Alyousef et al. (2018)	400	100	710	SF2

Fonte: Próprio autor.

Com relação ao teor de fibras de aço incorporada nas misturas, os resultados obtidos nesta pesquisa estão condizentes com o de outros pesquisadores, onde observa-se a tendência de diminuição do espalhamento com aumento do teor de fibras de aço na mistura (ALFERES FILHO, 2016; SHIMOSAKA, 2017; GHASEMI; GHASEMI; MOUSAVI, 2019; ASLANI e KELIN, 2018).

Com relação ao tempo de escoamento ( $t_{500}$ ) do CAA, ensaio que mede a viscosidade, segundo ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017c), os resultados estão na Figura 25. Na Tabela 34 mostram-se as classificações dos traços no estado fresco dos CAA de acordo com as classes de viscosidade.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 34: Classificação dos traços de acordo com as classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$ .

Classe	$t_{500}$ (s)	T1	T2	T3	R1	R2	R3
VS 1	$\leq 2$	X	X		X	X	X
VS 2	$> 2$			X			

Fonte: Próprio autor.

Este ensaio avalia a viscosidade plástica aparente das misturas. Nota-se que para a mistura R3, com adição de pó de mármore e granito e borracha, há maior coesão que para a mistura de referência R1, não apresentando segregação visível, uma vez que o agregado acompanha a argamassa até a extremidade do círculo, não se agrupando no centro.

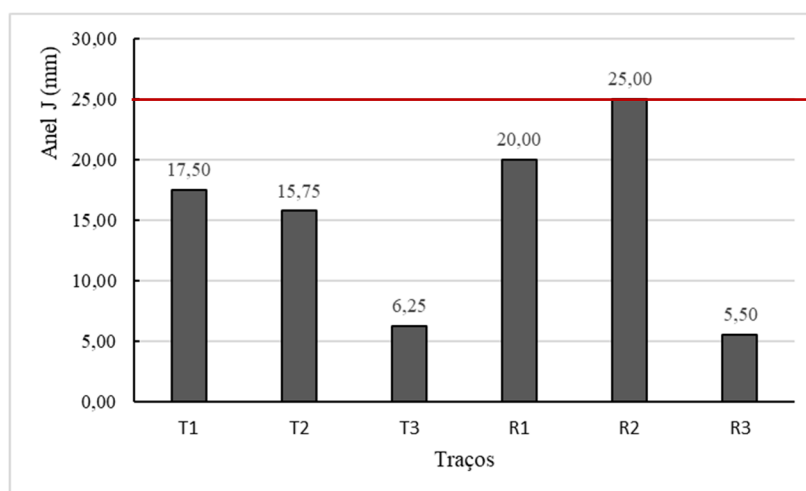
Foi verificado, nos trabalhos de Gesoglu et al. (2012) que, para misturas com até  $104 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore e consumo de cimento de  $416 \text{ kg/m}^3$ , os valores para esta propriedade foram classificados como VS 2. Da mesma forma, na pesquisa de Hameed et al. (2016) para consumo de cimento de 400 a  $475 \text{ kg/m}^3$ , os valores determinados para a viscosidade estão na faixa de 4,6 a 6 segundos, classificando as misturas de CAA com quantidade de pó de mármore de  $25 \text{ kg/m}^3$ ,  $50 \text{ kg/m}^3$ ,  $75 \text{ kg/m}^3$ ,  $100 \text{ kg/m}^3$  como VS 2.

## 4.2.2 Habilidade passante pelo método do anel J

Com relação ao ensaio que mede a habilidade passante, segundo ABNT NBR 15823-3 (ABNT, 2017d), os resultados estão na Figura 26.

Na Tabela 35 apresentam-se as classificações dos traços no estado fresco dos CAA, de acordo com as classes de habilidade passante.

Figura 26: Resultados do Anel J para os traços de CAA estudados.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 35: Classificação dos traços de acordo com as classes de habilidade passante pelo anel J.

Classe	Anel J (mm)	T1	T2	T3	R1	R2	R3
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	X	X	X	X		X
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço					X	

Fonte: Próprio autor.

Este ensaio avalia a habilidade passante e verifica-se que todas as misturas apresentam valores iguais ou inferiores a 25 mm, indicando boa capacidade passante do concreto por obstáculos.

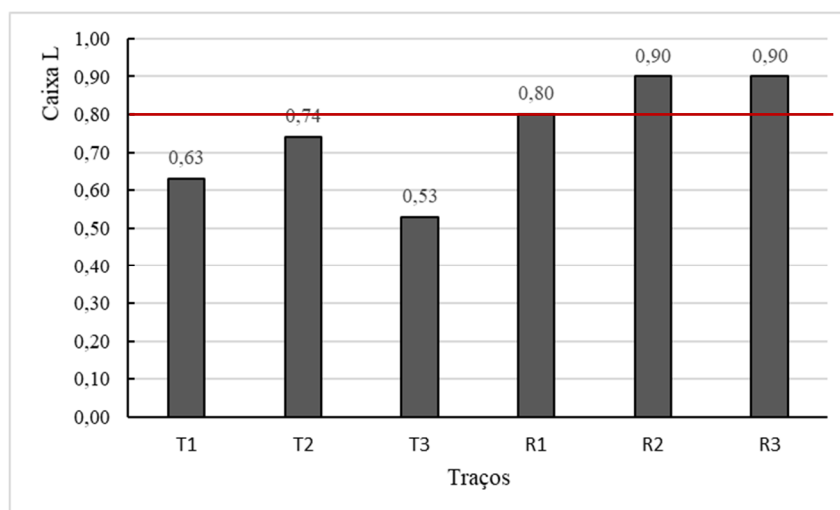
Segundo Boukhelkhal et al. (2016), valores entre 25 mm e 50 mm são sinônimo de bloqueio parcial, valores superiores a 50 mm indicam que a habilidade passante é prejudicada. Sadek; El-Attar; Ali (2016) observaram que, em geral, o aumento no teor de pó diminui a concentração de agregado graúdo, reduz o atrito interno entre as partículas sólidas e aumenta a capacidade do CAA de fluir na presença de obstáculos. No entanto, o uso de sílica ativa diminui a habilidade passante, ao contrário do efeito promovido pelos resíduos de mármore e granito.

Bušić et al.(2018) também observaram que a habilidade passante é reduzida com o acréscimo de resíduos de borracha na mistura.

### 4.2.3 Habilidade passante pelo método da caixa L

A fluidez do CAA também foi medida pela caixa L e os resultados estão na Figura 27. Na Tabela 36 estão as classificações dos traços dos CAA no estado fresco, de acordo com as classes de habilidade passante. Este ensaio mede a fluidez do concreto e sua capacidade de passar por obstáculos mantendo-se coeso.

Figura 27: Resultados da caixa L para os traços de CAA estudados.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 36: Classificação dos traços de acordo com as classes de habilidade passante pela caixa L.

Classe	Caixa L (H2/H1)	T1	T2	T3	R1	R2	R3
PL 2	≥ 0,80, com três barras de aço				X	X	X

Fonte: Próprio autor.

Os traços R1, R2 e R3 atenderam aos limites da norma para esta propriedade. Os traços apresentaram um ótimo desempenho em relação aos traços T1, T2 e T3. As misturas R2 e R3 apresentaram o mesmo comportamento no ensaio, embora o traço R3 apresente maior coesão visual.

Para os traços T1, T2 e T3 observou-se, durante o ensaio, que a presença de fibras impediu a passagem do concreto por entre as três barras de aço, resultando em valores inferiores a 0,80. Por este motivo, foram produzidos os concretos de traços R1, R2 e R3 com menor teor de fibras de aço que atenderam aos limites da ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b), para esta propriedade.

Para as misturas com resíduos de borracha T3 (5%) e R3 (2,5%) foram obtidos os valores de 0,53 e 0,90 respectivamente, para a habilidade passante. Angelin et al. (2018)

também verificaram que com o aumento do teor de borracha houve diminuição da habilidade passante na caixa L. Na Tabela 37 estão alguns resultados referentes a habilidade passante, de outros pesquisadores.

Tabela 37: Resultados de pesquisas referentes a habilidade passante pela caixa L.

<b>Pesquisas</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>teor de mármore (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Caixa L</b>
Lisbôa (2004)	415	208	0,89
	421	211	0,98
Gesoglu et al. (2012)	416	até 104	0,80
Manikandan e Felixkala (2015)	343	175,25	1,20
Hameed et al. (2016)	400	100 kg/m <sup>3</sup>	0,70
Alyousef et al. (2018)	400	100	0,85

Fonte: Próprio autor.

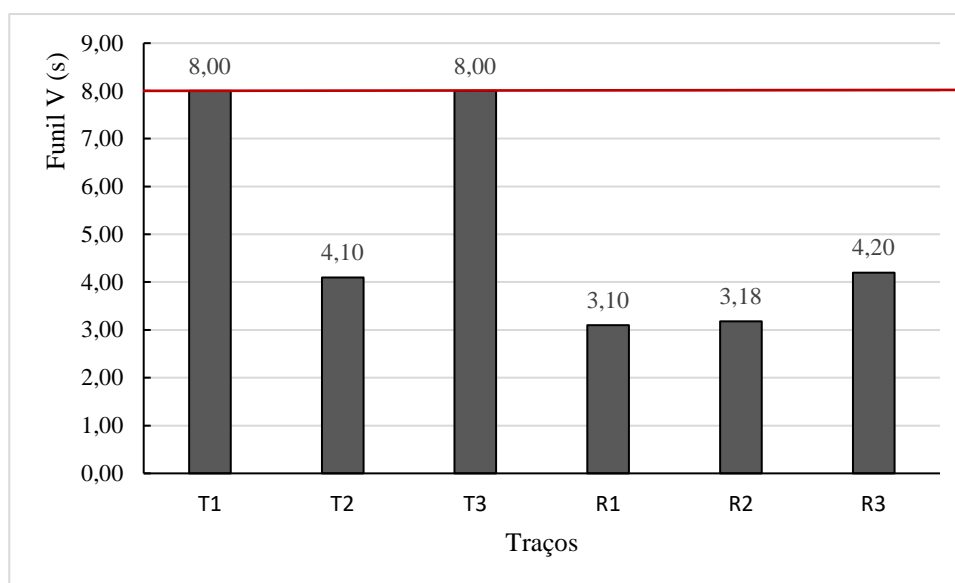
Gesoglu et al. (2012) observaram que, para mistura com até 104 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore, os valores da caixa L são próximos a 0,80. Os pesquisadores também verificaram que o emprego de pó de mármore aumenta a viscosidade do concreto quando comparado ao concreto de referência. Hameed et al. (2016) verificaram para as misturas com 25 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup> e 75 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore o valor de 0,80 para a habilidade passante e, para a mistura com 100 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore, o valor de 0,70. Alyousef et al. (2018) obtiveram valores na faixa de 0,85 para CAA com consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e de resíduos de mármore de 100 kg/m<sup>3</sup>. Manikandan e Felixkala (2015) obtiveram, para o consumo de 175,25 kg/m<sup>3</sup> de pó de granito e consumo de cimento de 343 kg/m<sup>3</sup>, o valor de 1,20 para a habilidade passante. Este valor foi diminuindo para teores crescentes de pó de mármore na mistura.

Quanto à influência das fibras de aço, verifica-se que com o aumento do teor de fibras há diminuição da capacidade do CAA passar por obstáculos (ALFERES FILHO, 2016; GHASEMI; GHASEMI; MOUSAVI, 2019).

#### 4.2.4 Viscosidade pelo método do funil V

A viscosidade do CAA também foi medida pelo Funil V e os resultados estão expressos na Figura 28. Na Tabela 38 mostram-se as classificações dos traços no estado fresco dos CAA de acordo com as classes de viscosidade plástica.

Figura 28: Resultados do Funil V para os traços de CAA estudados.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 38: Classificação dos traços de acordo com as classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V.

Classe	Funil V (s)	T1	T2	T3	R1	R2	R3
VF 1	≤ 8	X	X	X	X	X	X
VF 2	9 a 25						

Fonte: Próprio autor.

No funil V medem-se a fluidez e viscosidade pela queda livre do CAA. As misturas com adição de borracha T3 e R3 possuem maiores tempos de escoamento em relação a T2, R1 e R2, respectivamente. Todas as misturas estão classificadas dentro dos limites da ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017b).

O traço T2 apresentou uma fluidez significativamente maior que o traço T1, próximo da metade do tempo de escoamento. O traço R2 manteve fluidez próxima do traço R1 e o traço R3 apresentou aumento de 35% em relação ao traço R1.

Os traços com resíduos de borracha T3 (com consumo de 18 kg/m<sup>3</sup>) apresentou o valor de 8 segundos, e R3 (com consumo de 9 kg/m<sup>3</sup>) apresentou o valor de 4,2 segundos, mostrando a influência do teor de borracha nesta propriedade. Valores próximos de 5 segundos para a



mistura com 5% de borracha em substituição ao teor de areia foram obtidos por Angelin et al. (2018). Na Tabela 39 estão alguns resultados de outros pesquisadores, referentes a viscosidade plástica.

Tabela 39: Resultados de pesquisas referentes a viscosidade plástica.

<b>Pesquisas</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>teor de mármore (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Funil V (s)</b>
Sadek; El-Attar; Ali (2016)	400	200	10,40
Manikandan e Felixkala (2015)	343	175,25	12,67
Hameed et al. (2016)	400	100	12
Alyousef et al. (2018)	400	100	4,33

Fonte: Próprio autor.

Manikandan e Felixkala (2015) obtiveram, para consumo de pó de granito de 175,25 kg/m<sup>3</sup> e consumo de cimento de 343 kg/m<sup>3</sup>, o valor de 12,67 segundos para esta propriedade. Este valor foi diminuindo para teores crescentes de pó de mármore na mistura.

Hameed et al. (2016) verificaram para as misturas com 25 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup>, 75 kg/m<sup>3</sup> e 100 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore, valores de 8 a 12 segundos para a medida da fluidez pelo funil V. Segundo Boukhelkhal et al. (2016), para valores superiores a 12 segundos, o CAA pode ser muito viscoso, sem fluidez suficiente para passar por áreas com alta taxa de armadura. Sadek; El-Attar; Ali (2016) também encontraram o valor de 10,4 segundos para o consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e consumo de mármore e granito de 200 kg/m<sup>3</sup>. Já Alyousef et al. (2018) obtiveram o valor de 4,33 segundos para CAA com consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e de resíduos de mármore de 100 kg/m<sup>3</sup>.

#### **4.2.5 Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**

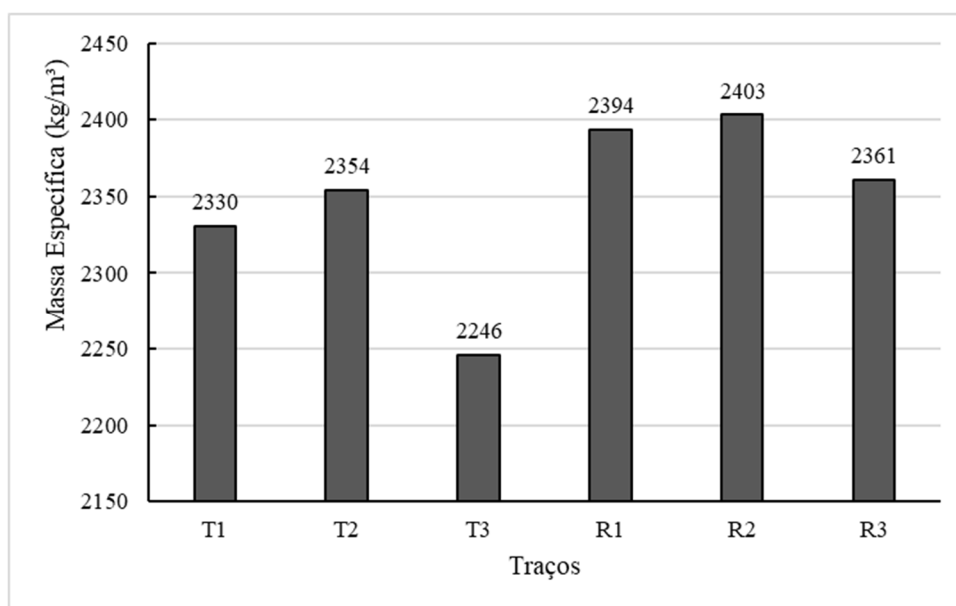
Foram realizados, no estado fresco, ensaios para determinação das massas específicas, dos rendimentos e dos teores de ar pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833; ABNT, 2009e), apresentados na Tabela 40. Nas Figuras 29 e 30 estão os resultados das massas específicas e teores de ar incorporado dos CAA.

Tabela 40: Características dos traços estudados.

Traço	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Rendimento (m <sup>3</sup> )	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Índice de Ar	Teor de Ar (%)
<b>T1</b>	2330	0,088	0,084	1,044	4,21
<b>T2</b>	2354	0,091	0,088	1,036	3,48
<b>T3</b>	2246	0,096	0,089	1,077	7,17
<b>R1</b>	2394	0,085	0,084	1,016	1,60
<b>R2</b>	2403	0,085	0,084	1,011	1,09
<b>R3</b>	2361	0,086	0,084	1,027	2,58

Fonte: Próprio autor.

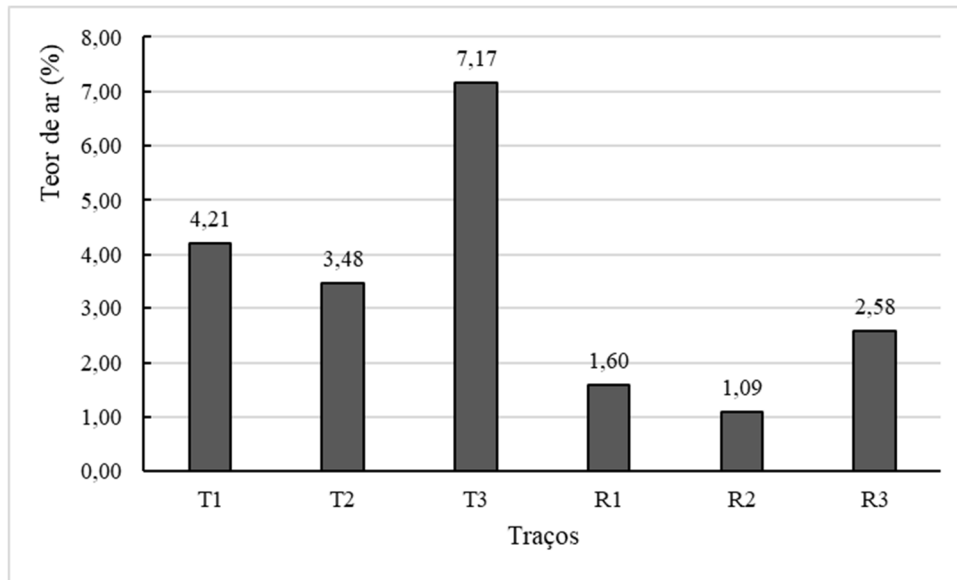
Figura 29: Resultados das massas específicas dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

Como esperado, as misturas com borracha tiveram suas massas específicas diminuídas em função de sua densidade. Os concretos produzidos não podem ser classificados como leves, pois todos os valores de massa específica estão acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>, sendo classificados como concreto normal com massas específicas compreendidas entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup> (ABNT NBR 8953; ABNT, 2015a).

Figura 30: Resultados do teor de ar incorporado dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

Os resíduos de borracha incorporam ar na mistura, sendo que o traço R3, comparando-se ao traço T3, apresentou menor valor de incorporação de ar. As misturas T2 e R2 apresentaram valores menores que T1 e R1, respectivamente, também demonstrando maior coesão da pasta. Alyousef et al. (2018) obtiveram valor de ar incorporado de 2,2% para a mistura de CAA com consumo de cimento de  $400 \text{ kg/m}^3$  e consumo de resíduos de mármore de  $100 \text{ kg/m}^3$ .

### 4.3 Resultados provenientes dos ensaios do CAA no estado endurecido

#### 4.3.1 Determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão segundo a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2009d)

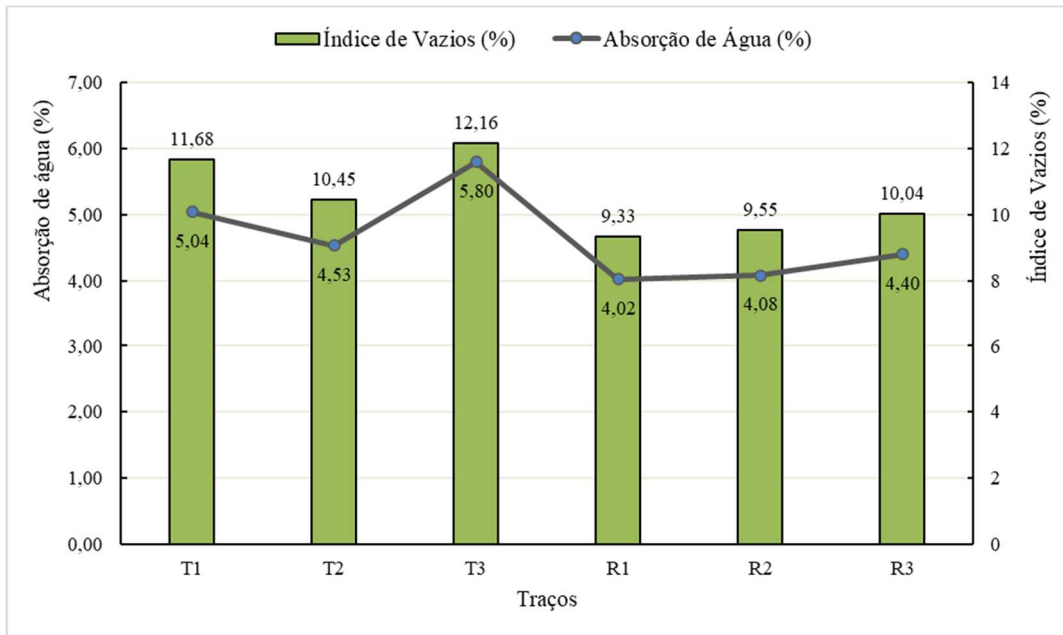
Os resultados dos ensaios dos CAA no estado endurecido para a determinação das massas específicas, índice de vazios e absorção de água por imersão, segundo ABNT NBR 9778 (ABNT, 2009d), estão mostrados na Tabela 41 e Figuras 31 e 32.

Tabela 41: Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão.

Traço	Absorção de Água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
<b>T1</b>	5,04 (±0,57)	11,68 (±1,27)	2319 (±12,58)
<b>T2</b>	4,53 (±0,03)	10,45 (±0,07)	2306 (±3,48)
<b>T3</b>	5,80 (±0,12)	12,16 (±0,21)	2097 (±12,04)
<b>R1</b>	4,02 (±0,08)	9,33 (±0,17)	2320 (±3,48)
<b>R2</b>	4,08 (±0,06)	9,55 (±0,09)	2339 (±17,05)
<b>R3</b>	4,40 (±0,01)	10,04 (±0,08)	2280 (±15,66)

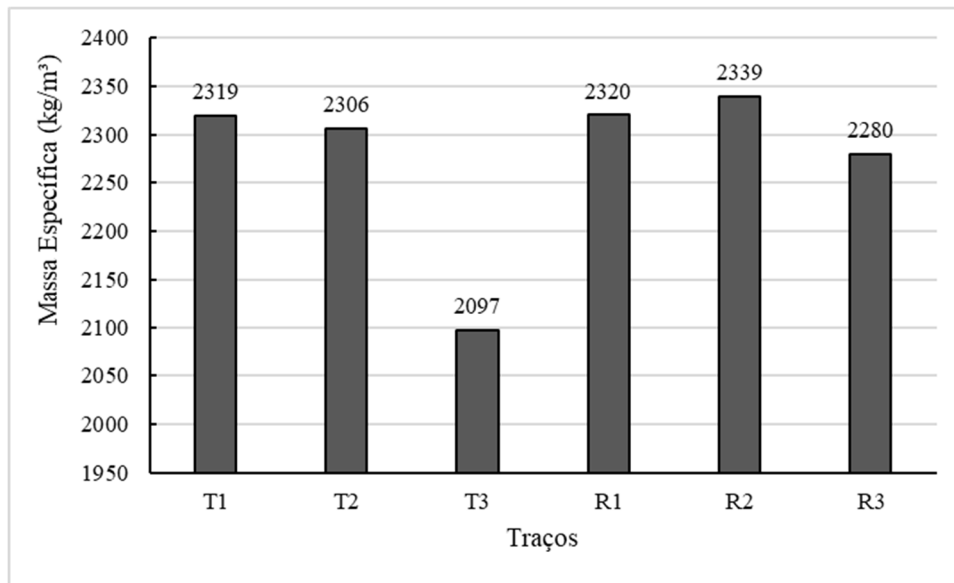
Fonte: Próprio autor.

Figura 31: Resultados da absorção de água e índice de vazios dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32: Resultados das massas específicas das amostras secas dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

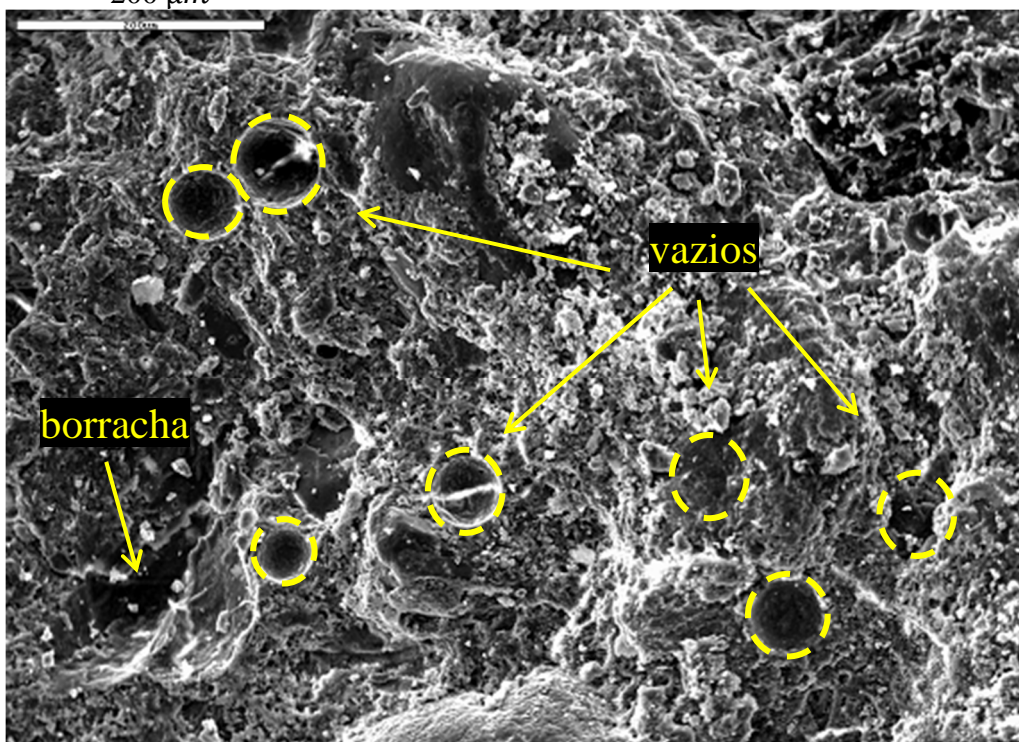
Verifica-se que, para as misturas contendo conjuntamente resíduos de mármore e granito e borracha, os valores de absorção de água e índice de vazios são maiores em relação às misturas sem borracha para os respectivos grupos T1, T2 e R1, R2. Este fato é atribuído a incorporação de ar pela borracha nas misturas de concreto gerando maior índice de vazios. Observa-se que a absorção de água e o índice de vazios são menores para a mistura R3 comparando-se com o traço T3. Isto pode ser comprovado pelas imagens das microestruturas dos traços mostradas na Figura 33.

Com relação ao teor de fibras nas misturas, comprovou-se que, o aumento na taxa de fibras de aço contribuiu para o aumento da porosidade.

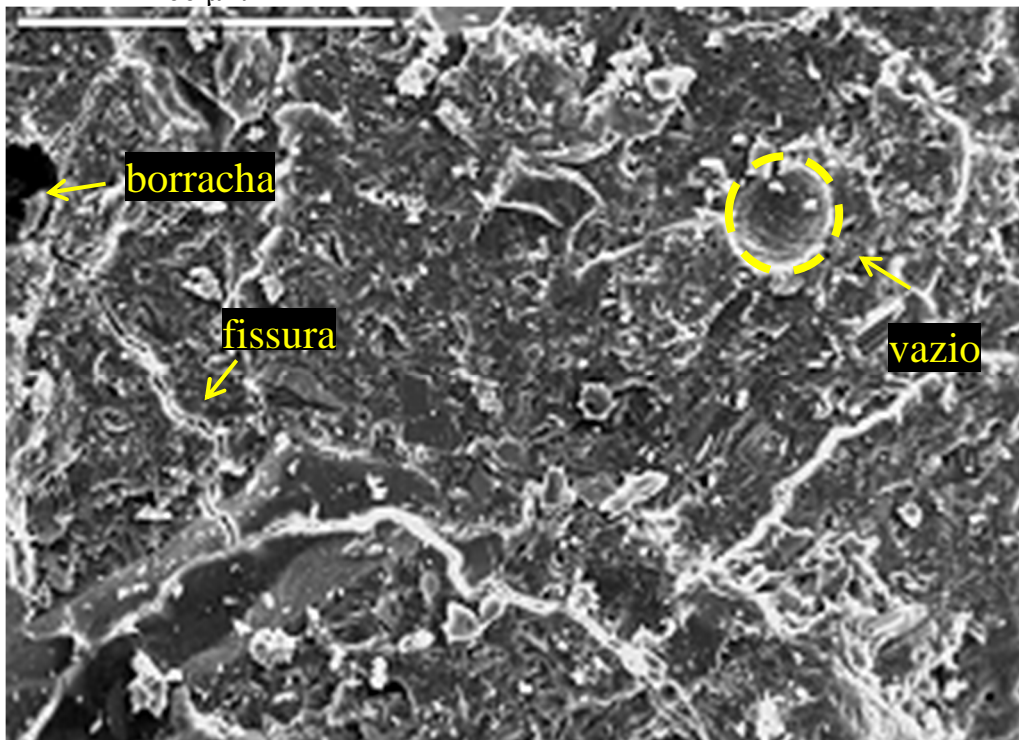
Os concretos produzidos são classificados como concreto normal com massas específicas compreendidas entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $2800 \text{ kg/m}^3$  (ABNT NBR 8953; ABNT, 2015a).

Angelin et al. (2015) também verificaram reduções das massas específicas para os concretos com borracha.

Figura 33: Micrografia do concreto autoadensável: (a) traço T3 e (b) traço R3.

200  $\mu\text{m}$ 

(a) T3

200  $\mu\text{m}$ 

(b) R3

Fonte: Próprio autor.

## 4.3.2 Ensaios Estáticos

### 4.3.2.1 Resistência à compressão e resistência à tração

Nas Tabelas 42 e 43 e Figuras 34 e 35 estão os resultados dos ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739; ABNT, 2018a) e à tração (ABNT NBR 7222; ABNT, 2011) realizados no estado endurecido dos CAA.

Tabela 42: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.

Traços	Resistência à Compressão (MPa) 7 dias	DP (MPa)	CV (%)	Resistência à Compressão (MPa) 28 dias	DP (MPa)	CV (%)
T1	50,39	2,24	4,45	70,96	2,05	2,89
T2	54,75	1,60	2,93	72,68	2,64	3,64
T3	34,87	2,73	7,84	45,46	1,88	4,14
R1	58,12	1,02	1,76	73,35	1,40	1,91
R2	57,33	0,96	1,67	73,31	3,20	4,37
R3	49,88	1,47	2,95	62,69	3,07	4,90

DP = desvio padrão

CV = coeficiente de variação

Fonte: Próprio autor.

Tabela 43: Resultados dos ensaios de resistência à tração, aos 7 e 28 dias de idade.

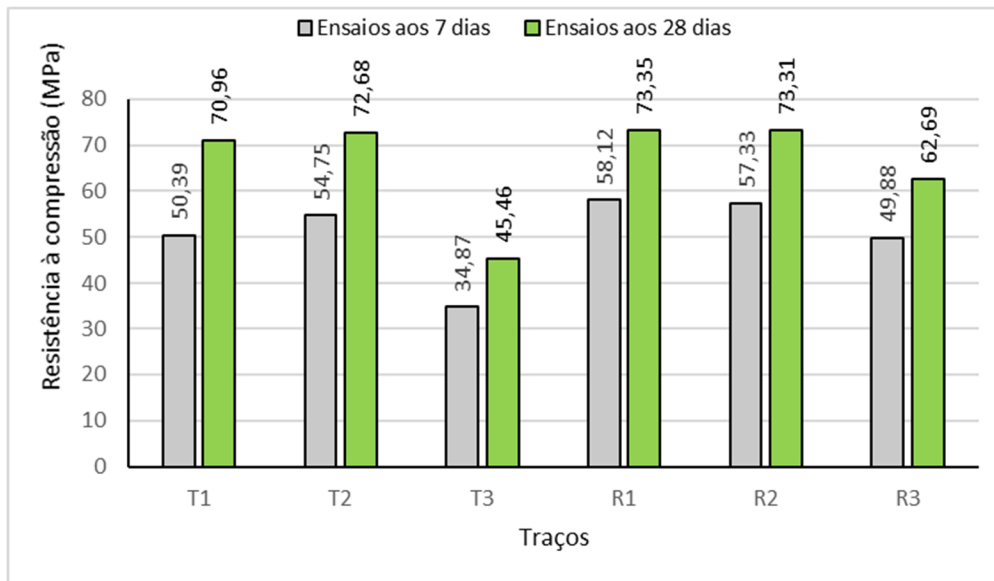
Traços	Resistência à Tração (MPa) 7 dias	DP (MPa)	CV (%)	Resistência à Tração (MPa) 28 dias	DP (MPa)	CV (%)
T1	6,04	0,16	2,73	6,06	0,14	2,36
T2	5,45	0,30	5,57	7,32	0,15	2,10
T3	4,10	0,24	5,96	5,28	0,66	12,47
R1	5,75	0,17	2,97	6,40	0,25	4,00
R2	5,81	0,28	4,87	6,76	0,47	6,94
R3	5,36	0,57	10,57	5,57	0,45	8,00

DP = desvio padrão

CV = coeficiente de variação

Fonte: Próprio autor.

Figura 34: Resultados da resistência à compressão dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 42 verificou-se que, para a resistência à compressão, os traços R1, R2, R3 apresentaram maiores valores para esta propriedade que os traços T1, T2, T3. Todas as composições de concreto estudadas são classificadas como concreto estrutural segundo a ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015a). E, com exceção do traço T3, as demais composições estudadas neste trabalho são pertencentes a classe do grupo II, cuja resistência  $\geq 55$  MPa sendo considerados concretos de alta resistência, aos 28 dias. Todos os traços, com exceção do traço T3 (com incorporação de 5% de resíduo de borracha), podem ser classificados como concreto de alto desempenho, pois se enquadram dentro da classe I (50-75 MPa), segundo Aïtcin (2000).

O emprego de  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço para os traços T1, T2, T3 não influenciaram esta propriedade comparando-se com os traços R1, R2, R3 que utilizaram  $10 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço no CAA. Nota-se que houve um aumento de 3,36% para a resistência à compressão de R1 em relação a T1.

O uso de  $105 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore para o traço T2 também parece não ter influenciado significativamente nesta propriedade, mesmo com a diminuição do consumo de cimento, que parece ter sido compensado pelo uso do pó de mármore com pequeno aumento da resistência à compressão, em relação a T1. O uso de  $105 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore para R2 não influenciou a resistência à compressão, em relação a R1. Com relação à adição de pó de mármore na mistura, houve um aumento pouco significativo da resistência à compressão para a mistura T2 em relação a T1 de 2,42%, sendo que os valores para o traço R1 e R2 são muito próximos.



A resistência à compressão é grandemente afetada nos traços T3 e R3, que contêm resíduo de borracha incorporado na mistura. O traço T3 apresentou o menor valor de resistência à compressão, dentre todos os traços, que corresponde a uma queda de 35,9% em relação à resistência da mistura T1. A mistura R3 apresentou 14,5% de decréscimo da resistência à compressão em relação a R1.

Para os traços R1, R2, R3 o consumo de cimento foi mantido constante ( $366 \text{ kg/m}^3$ ), de forma que os resíduos incorporados em R2 e R3 substituíram a massa de areia. Esta condição contribuiu para que suas resistências fossem maiores que T2 (consumo de cimento de  $350 \text{ kg/m}^3$ ) e T3 (consumo de cimento de  $345 \text{ kg/m}^3$ ).

Ghasemi; Ghasemi; Mousavi (2019) também observaram a queda da resistência à compressão com o aumento do teor de fibras para CAA reforçado com teores de 0,1% e 0,3% de fibras de aço de 30 mm de comprimento. Poveda et al. (2017) verificaram que CAA com teores de fibras de aço 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, apresentaram para a resistência à compressão valores muito próximos na faixa de 30,3 MPa e 32,5 MPa, não influenciando esta propriedade.

Na Tabela 44 estão alguns resultados de outros pesquisadores, referentes a resistência à compressão de concretos com resíduos de mármore.

Tabela 44: Resultados de pesquisas referentes a resistência à compressão.

<b>Pesquisas</b>	<b>Consumo de cimento (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>Teor de mármore (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
Topçu; Bilir; Uygunoğlu (2009)	495 a 270	50 a 300	> 40MPa (até $200 \text{ kg/m}^3$ ) 30MPa (> $200 \text{ kg/m}^3$ )
Gesoglu et al. (2012)	416	até 104	> 40MPa
Manikandan e Felixkala (2015)	343	175,25	33,85
Boukhelkhal et al. (2016)	376	94	26
Hameed et al. (2016)	500 a 400	0 a 100	57,54 a 43,5
Sadek; El-Attar; Ali (2016)	400	200	55,1
Alyousef et al. (2018)	400	100	41

Fonte: Próprio autor.

Os valores de resistência à compressão encontrados na pesquisa de Topçu; Bilir; Uygunoğlu (2009) para as misturas cujo consumo de cimento foi de 495 a  $270 \text{ kg/m}^3$  e quantidade de mármore de 50 a  $300 \text{ kg/m}^3$  foram: resistência maior que 40 MPa (para traços

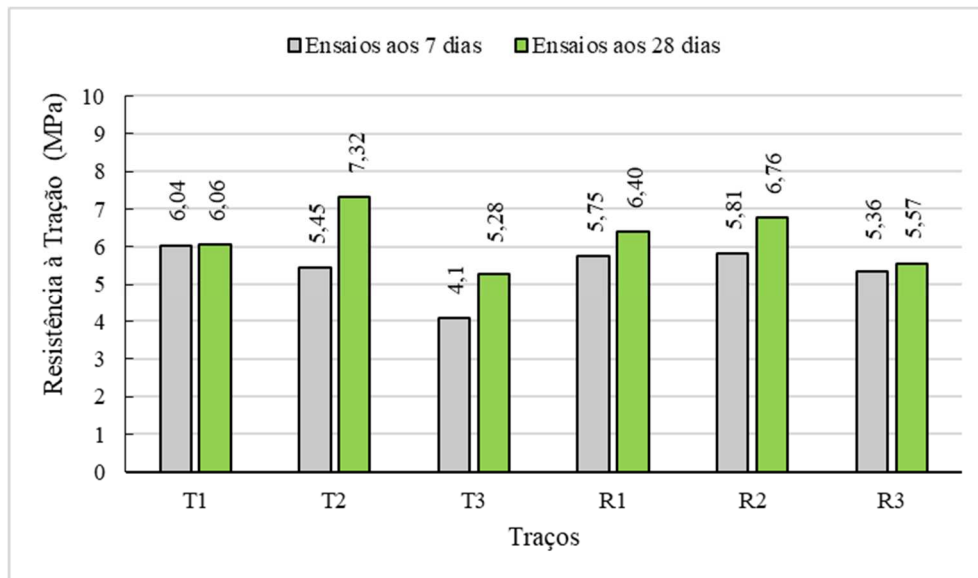
com consumo de resíduo de mármore de até  $200 \text{ kg/m}^3$ ) e 30 MPa (para traços com consumo de resíduo de mármore maior que  $200 \text{ kg/m}^3$ ). Gesoglu et al. (2012) também observaram que a resistência à compressão, aos 90 dias, dos CAA contendo pó de mármore e filer calcário variou de 56,8 a 70,1 MPa. Para misturas ternárias de concreto (com pó de mármore, filer calcário e cinzas volantes) a resistência à compressão ficou na faixa de 57,7 e 71,0 MPa. Manikandan e Felixkala (2015) obtiveram para consumo de pó de granito de  $175,25 \text{ kg/m}^3$  e consumo de cimento de  $343 \text{ kg/m}^3$  o valor de 33,85 MPa para a resistência à compressão. Este valor foi diminuindo para teores crescentes de pó de mármore na mistura. Sadek; El-Attar; Ali (2016) obtiveram resistência à compressão de 55,1 MPa, para o CAA com consumo de cimento de  $400 \text{ kg/m}^3$  e consumo de mármore e granito de  $200 \text{ kg/m}^3$ . Boukhelkhal et al. (2016) obtiveram, para a mistura com  $94 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore e quantidade de cimento de  $376 \text{ kg/m}^3$ , a resistência à compressão de 26 MPa, valor inferior ao da mistura de referência que apresentou 37 MPa. Alyousef et al. (2018) obtiveram o valor de resistência à compressão de 41 MPa para CAA com consumo de cimento  $400 \text{ kg/m}^3$  e consumo de resíduos de mármore de  $100 \text{ kg/m}^3$ . Hameed et al. (2016) verificaram para CAA com consumo de cimento de  $500 \text{ kg/m}^3$ , que teores até 15% de pó de mármore em substituição a massa de cimento podem ser empregados sem afetar as resistência à compressão e à flexão dos mesmos. Para a incorporação de  $100 \text{ kg/m}^3$  de pó de mármore os pesquisadores obtiveram diminuição de 27% em relação ao concreto referência.

Quanto a influência do resíduo de borracha na resistência à compressão dos concretos, observam-se resultados similares na literatura. Aslani (2016) e Najim e Hall (2012) também verificaram a redução da resistência à compressão com a crescente incorporação de borracha na mistura. Da mesma forma, Angelin et al. (2018) verificaram queda na resistência à compressão nas misturas de CAA com  $13 \text{ kg/m}^3$  e  $26 \text{ kg/m}^3$  de borracha em relação ao traço de referência, obtendo valores em torno de 31,4 MPa e 35,6 MPa, respectivamente. Yung; Yung; Hua (2013) analisaram o desempenho mecânico de CAA com consumo de cimento de  $300 \text{ kg/m}^3$ , com 5%, 10%, 15% e 20% de resíduos de borracha em substituição à massa de agregado miúdo, e verificaram que, para a mistura com 5% de resíduos de borracha que passou na peneira 50, a resistência à compressão, aos 28 dias, foi de 30,94 MPa. Para os demais teores de borracha na mistura os valores de resistência tiveram uma queda de 23% a 29%. Os pesquisadores observaram que o CAA contendo 5% de resíduos de borracha em substituição a massa de agregado miúdo, cujas partículas passaram pela peneira 50, tiveram acréscimo de resistência à compressão, aos 91 dias, de 10% em relação a referência. Segundo Hilal (2017) e Aslani (2016), a diminuição da resistência com o aumento do teor de borracha no concreto é atribuída a dois

motivos: (a) as fissuras são iniciadas rapidamente perto das partículas de borracha na mistura; (b) as partículas de borracha funcionam como vazios na matriz de concreto devido à ausência de aderência entre as partículas de borracha e a pasta.

Alsaif et al. (2018) e Aslani e Kelin (2018) verificaram para concretos contendo resíduos de borracha que a incorporação de fibras de aço na mistura aumentou a resistência à compressão. Alsaif et al. (2018) obtiveram aumento de até 30% na resistência à compressão para 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço no concreto e Aslani e Kelin (2018) obtiveram aumento de 48% para 0,25% de fibras de aço em relação ao volume do concreto (20 kg/m<sup>3</sup>).

Figura 35: Resultados da resistência à tração dos traços estudados, aos 7 e 28 dias.



Fonte: Próprio autor.

A influência do emprego do teor de 20 e 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço é menos significativa para a resistência à tração que para a resistência à compressão. Houve ganho de resistência à tração para T2 e R2 em relação a T1 e R1, respectivamente.

Diferente do que aconteceu para a resistência à compressão, em que houve uma queda brusca para os traços T3 e R3 devido ao uso de resíduos de borracha; observa-se aqui que esta propriedade foi menos afetada, com diminuição de 12,97% para R3 em relação a R1 e de 12,87% para T3 em relação a T1.

Na Figura 35, comparando-se os valores da resistência à tração aos 28 dias dos traços T1 (20 kg/m<sup>3</sup>) e o traço R1 (10 kg/m<sup>3</sup>), nota-se que há um aumento de 5,61% para a resistência à tração de R1 em relação a T1.

Em relação ao traço T2 e R2, ambos apresentaram ganho de 20,79% e 5,62% em relação aos traços de referência T1 e R1, respectivamente.

Angelin et al. (2018) e Aslani (2016, 2018) também verificaram que traços de CAA com borracha apresentam perdas menores de resistência à tração comparando-se com a resistência à compressão. Hilal (2017) também verificou que os melhores resultados nesta propriedade foram para concretos autoadensáveis produzidos com resíduos de borracha de dimensão menor que 1 mm. Aslani e Kelin (2018) obtiveram aumento de 47% na resistência à tração para CAA contendo 48,12 kg/m<sup>3</sup> de borracha e 0,25% de fibras de aço em relação ao volume da mistura (20 kg/m<sup>3</sup>).

Na Tabela 45 estão alguns resultados de outros pesquisadores, referentes a resistência à tração de CAA contendo resíduos de mármore.

Tabela 45: Resultados de pesquisas referentes a resistência à tração.

<b>Pesquisas</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de mármore (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>
Gesoglu (2012)	416	até 104	3
Manikandan e Felixkala (2015)	343	175,25	4,17
Boukhelkhal et al. (2016)	376	94	2,96
Sadek; El-Attar; Ali (2016)	400	200	4

Fonte: Próprio autor.

Gesoglu et al. (2012) também observaram que para a mistura com 104 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore os valores de resistência à tração foram próximo de 3 MPa aos 28 dias.

Manikandan e Felixkala (2015) obtiveram, para consumo de 175,25 kg/m<sup>3</sup> de pó de granito e consumo de cimento de 343 kg/m<sup>3</sup> o valor de 4,17 MPa para esta propriedade. Este valor foi diminuindo para teores crescentes de pó de mármore na mistura.

Boukhelkhal et al. (2016) observaram que a resistência à tração acompanha a resistência à compressão, encontrando 2,96 MPa para o CAA com 94 kg/m<sup>3</sup> de pó de mármore e consumo de cimento de 376 kg/m<sup>3</sup>.

Sadek; El-Attar; Ali (2016) obtiveram resistência à tração de 4 MPa para o consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e consumo de mármore e granito de 200 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2.2 Módulo de elasticidade estático

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade estático, segundo a ABNT NBR 8522 (ABNT, 2017a), dos concretos estudados estão na Tabela 46 e Figura 36.

Tabela 46: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático, aos 7 e 28 dias de idade.

<b>Traço</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa) 7 dias</b>	<b>DP (GPa)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa) 28 dias</b>	<b>DP (GPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>T1</b>	36,16	0,74	2,04	40,75	1,86	4,55
<b>T2</b>	37,03	1,94	5,23	40,08	0,64	1,61
<b>T3</b>	30,11	3,22	10,69	31,44	1,22	3,88
<b>R1</b>	34,48	0,78	2,28	39,80	1,21	3,05
<b>R2</b>	36,25	2,14	5,92	40,23	1,66	4,13
<b>R3</b>	34,71	0,89	2,57	37,41	1,58	4,23

DP = desvio padrão

CV = coeficiente de variação

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 36 verifica-se, aos 28 dias de idade, o módulo de elasticidade para os traços T1 e T2 são muito próximos, o que também acontece para os traços R1 e R2. Comparando-se os traços sem resíduos, T1 e R1, observa-se que ocorreu uma redução de 2,38% para o traço R1 em relação ao traço T1 (sem resíduos).

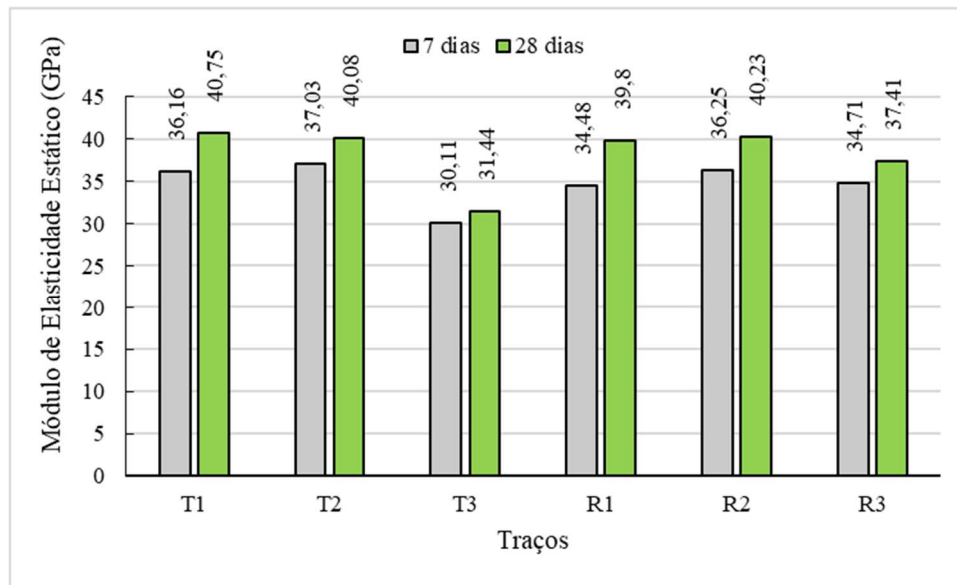
Para os traços com borracha as diminuições são de 22% para o traço T3 em relação a T1 e 6% para o traço R3 em relação a R1.

Shimosaka (2017) e Aslani e Kelin (2018) também notaram em suas pesquisas que aumentando-se o teor de fibras de aço no CAA há um ganho no módulo de elasticidade.

Hilal (2017) também verificou que o módulo elástico estático diminuiu com o aumento da dimensão da partícula e do teor de borracha, semelhante ao observado para ambas as resistências à tração e à compressão. O pesquisador verificou que os resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático variaram de 48,68 GPa (5% de borracha em relação aos agregados) a 30,98 GPa (25% de borracha em relação aos agregados).

Aslani (2016) também verificou que o módulo de elasticidade é afetado pela dimensão das partículas e quantidade de borracha na mistura.

Figura 36: Resultados do módulo de elasticidade estático dos traços estudados.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3.3 Ensaios Dinâmicos

#### 4.3.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

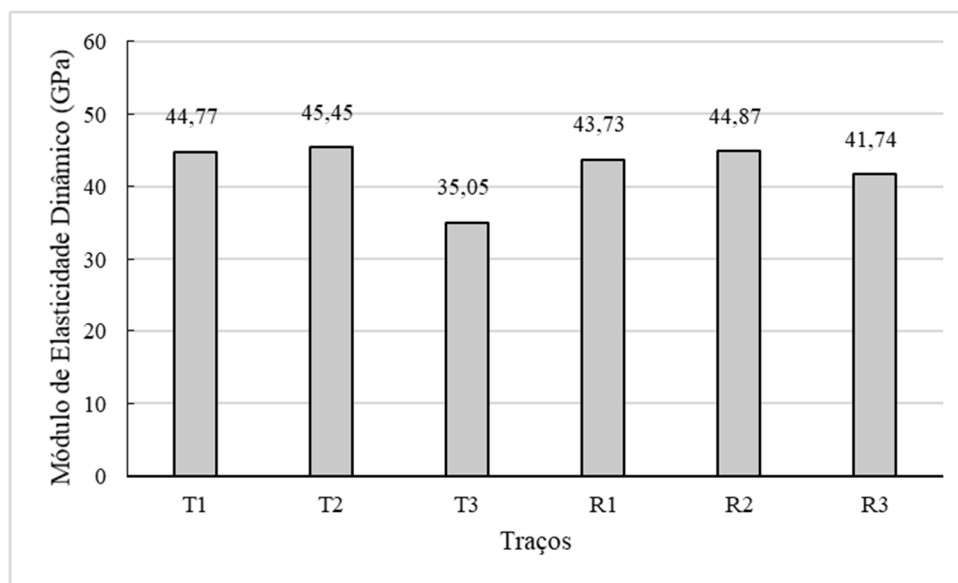
Nas Tabela 47 e Figura 37 estão os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico dos CAA, realizados no estado endurecido.

Tabela 47: Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias de idade.

Traços	Módulo de Elasticidade (GPa)					
	Longitudinal	DP (MPa)	CV (%)	Flexional	DP (MPa)	CV (%)
<b>T1</b>	44,77	0,51	1,13	45,46	0,53	1,17
<b>T2</b>	45,45	0,35	0,77	45,87	0,52	1,13
<b>T3</b>	35,05	0,46	1,33	35,15	0,60	1,71
<b>R1</b>	43,73	1,32	3,02	44,39	1,61	3,62
<b>R2</b>	44,87	0,57	1,27	45,60	0,25	0,55
<b>R3</b>	41,74	0,56	1,33	42,50	0,70	1,66

Fonte: Próprio autor.

Figura 37: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, aos 28 dias de idade.



Fonte: Próprio autor.

Como o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal é menor que o flexional, considera-se como módulo de elasticidade dinâmico, o longitudinal.

Na Tabela 48 mostram-se os ganhos nos valores dos módulos de elasticidade dinâmico longitudinal em relação ao módulo estático, aos 28 dias de idade.

Tabela 48: Ganho no valor de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal em relação ao módulo de elasticidade estático.

Traço	Ganho do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal em relação ao módulo de elasticidade estático (%)
<b>T1</b>	9,87
<b>T2</b>	13,40
<b>T3</b>	11,48
<b>R1</b>	9,87
<b>R2</b>	11,53
<b>R3</b>	11,57

Fonte: Próprio autor.

Conforme observa-se na Tabela 48, a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático apresentou valores na faixa de 9,87% a 13,40%.

O coeficiente de variação para o módulo de elasticidade dinâmico é menor que para o módulo estático, mostrando menor variabilidade nos resultados dos ensaios. A tendência quanto aos valores encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico é a mesma que para o estático, sendo que os traços sem borracha apresentam valores muito próximos entre si e a maior variação acontece para os traços com borracha.

Comparando-se os traços T1 e R1 verifica-se que para o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, aos 28 dias de idade, ocorreu uma redução de 2,32% para o traço R1 em relação ao traço T1, provavelmente devido ao teor de fibra de aço menor para R1 (10 kg/m<sup>3</sup>).

Os valores para o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal para T2 e R2 foram muito próximos de T1 e R1. Mas, para os traços T3 e R3 houve diminuição de 21,71% e 4,55% em relação a T1 e R1, respectivamente.

Almeida e Hanai (2008) e Mehta e Monteiro (2014) também verificaram que os resultados dos ensaios dinâmicos são sempre maiores quando comparados aos ensaios estáticos. Para concretos de média resistência (20 a 40 MPa) este acréscimo está em torno de 30% e para concretos de resistência acima de 40 MPa, 20%.

Da mesma forma Bilesky et al. (2017), ao realizarem o ensaio dinâmico por estímulo por impulso em concretos, obtiveram menores dispersões dos resultados nas medidas dos módulos de elasticidade dinâmico comparando-se com os módulos de elasticidade estático.

Najim e Hall (2012) e Li et al. (2019) notaram que o módulo de elasticidade dinâmico diminui de acordo com crescentes teores de borracha na mistura.

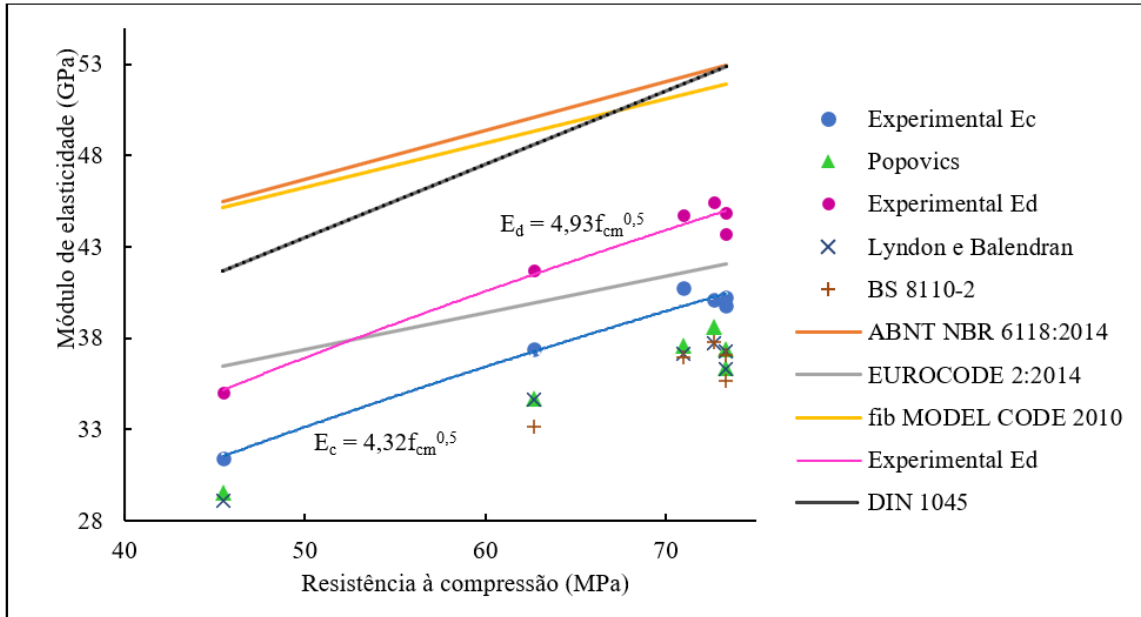
Benazzouk et al. (2007) também observaram o mesmo comportamento para pastas de cimento contendo resíduos de borracha.

Na Figura 38 estão as correlações entre os módulos de elasticidade e as resistências à compressão. Também estão indicados os resultados provenientes de algumas expressões empíricas que relacionam os módulos estático ( $E_c$ ) e dinâmico ( $E_d$ ) dados por Popovics, Lyndon e Balendran, BS 8110-2:1985. Nota-se que os módulos estático ( $E_c$ ) obtidos por meio destas expressões empíricas são em média 7% menores que os valores experimentais. Observa-se que para os valores experimentais do módulo dinâmico ( $E_d$ ) existe a correlação:  $E_d = 4,93 f_{cm}^{0,5}$ ,  $R^2 = 0,97$  e que melhor se adequam à curva referente a Eurocode 2:2014. Para os valores experimentais do módulo estático ( $E_c$ ) a correlação é dada pela Equação  $E_c = 4,32 f_{cm}^{0,5}$ ,  $R^2 = 0,98$  e observa-se que estes valores são inferiores aos valores experimentais obtidos pelo ensaio dinâmico ( $E_d$ ).

A variabilidade dos resultados se justifica pela natureza multifásica do concreto que influencia o módulo de deformação do material.



Figura 38: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3.3.2 Fator de amortecimento

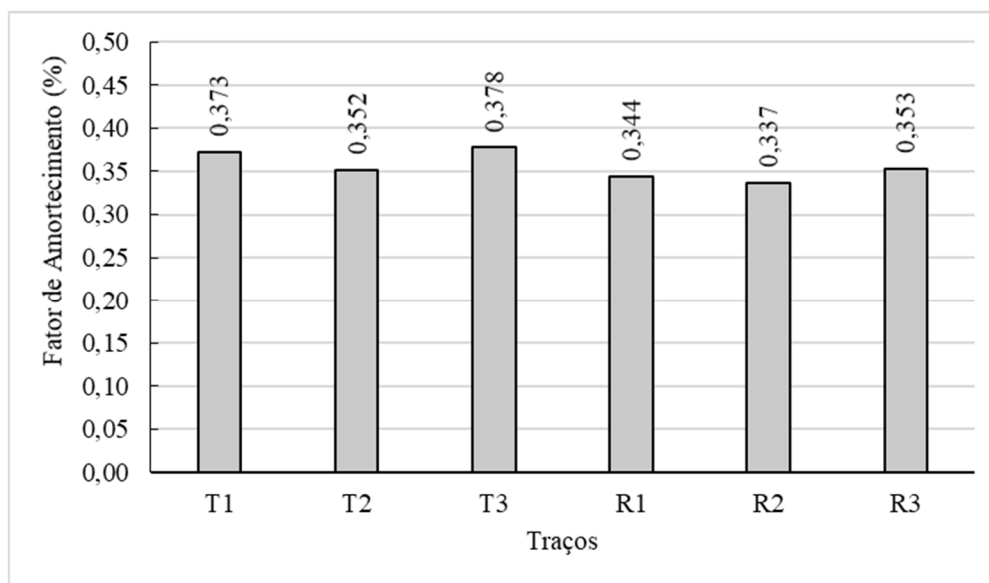
Na Tabela 49 e Figura 39 estão indicados os resultados do fator de amortecimento dos CAA

Tabela 49: Resultados do fator de amortecimento aos 28 dias de idade.

Traços	Fator de amortecimento	Coefficiente de variação (%)
T1	0,00373 (±0,00012)	3,20
T2	0,00352 (±0,00014)	4,09
T3	0,00378 (±0,00009)	2,37
R1	0,00344 (±0,00012)	3,43
R2	0,00337 (±0,00018)	5,23
R3	0,00353 (±0,00013)	3,59

Fonte: Próprio autor.

Figura 39: Resultados do fator de amortecimento dos traços estudados, aos 28 dias.



Fonte: Próprio autor.

Com relação a T1 ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) e R1 ( $10 \text{ kg/m}^3$ ), observa-se que com o aumento do teor de fibras de aço há um aumento do amortecimento de 7,77%.

Nota-se uma diminuição desta propriedade para os traços T2 e R2 em relação a T1 e R1, de 5,63% e 2,03%, respectivamente. Com relação a T3 e R3 observa-se aumento de 1,34% para T3 em relação a T1, e, de 2,61% para R3 em relação a R1. Observa-se que o emprego de maior teor de fibras de aço para os traços T1, T2 e T3 ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) tem maior influência sobre o fator de amortecimento comparando-se os traços R1, R2, R3 que possuem menores teores de fibras ( $10 \text{ kg/m}^3$ ). Com relação aos traços com borracha T3 (0,00378) e R3 (0,00353) estes apresentaram os maiores valores para o fator de amortecimento, em relação a T1, T2 e R1, R2 respectivamente.

Todos os valores do fator de amortecimento dos concretos estudados, estão acima dos materiais tradicionalmente empregados (o aço e o ferro fundido) na fabricação de bases de máquinas-ferramenta. O fator de amortecimento do aço é de 0,001 a 0,002 (BACHMANN et al., 1997) e do ferro fundido é de 0,0023 (SWAMY et al., 2014). Na Tabela 50 estão relacionados os ganhos do fator de amortecimento dos concretos ensaiados, em relação aos materiais tradicionais empregados na construção de bases de máquinas-ferramenta, o aço e o ferro fundido.

Tabela 50: Aumento do fator de amortecimento dos concretos ensaiados em relação ao aço e ferro fundido.

Traços	Aço (%)	Ferro fundido (%)
T1	86	62
T2	76	53
T3	89	64
R1	72	50
R2	68	46
R3	77	54

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 51 estão alguns resultados referentes ao módulo de elasticidade e fator de amortecimento do concreto com borracha.

Tabela 51: Resultados de pesquisas referentes a módulo de elasticidade e fator de amortecimento.

Pesquisas	Tipo	Resíduo de borracha	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa) 28d	Resistência à tração (MPa)	Fator de Amortecimento $\zeta$	Módulo dinâmico (GPa) 28d	Módulo Estático (GPa) 28d
Zheng; Huo; Yuan (2008)	Concreto convencional	0	401	-	-	0,0045-0,0074	43,7	31,8
		36,7 kg/m <sup>3</sup>				0,0062-0,0112	41,2	27,1
		73,4 kg/m <sup>3</sup>				0,0075-0,0142	35,2	24,1
		110,2 kg/m <sup>3</sup>				0,0070-0,0142	31,2	22,3
Rahman et al. (2001)	Concreto convencional	-	-	56,2	7,8	0,00151	-	21,7
Mahendrakumar; Syathabuthakeer; Mohanram (2014)	Concreto convencional	-	-	20-40	3-5	0,001	-	20-30
Li et al. (2019)	CAA	0	344	43,0	-	0,00375	45	-
		30 kg/m <sup>3</sup>		36,4		0,00450	40	
		60 kg/m <sup>3</sup>		32,7		0,00525	35	
		90 kg/m <sup>3</sup>		28,6		0,00625	30	
Próprio autor	CAA	0	365	70,96	6,06	0,00373	44,77	40,75
		0	350	72,68	7,32	0,00352	45,45	40,08
		18 kg/m <sup>3</sup>	345	45,46	5,28	0,00378	35,05	31,44
		0	366	73,35	6,40	0,00344	43,73	39,8
		0	366	73,31	6,76	0,00337	44,87	40,23
		9 kg/m <sup>3</sup>	366	62,69	5,57	0,00353	41,74	37,41

Fonte: Próprio autor.

Li et al. (2019) concluíram que a taxa de amortecimento do CAA aumenta linearmente com o teor de borracha, indicando melhor capacidade de dissipação de energia quando submetida a carga dinâmica. Najim e Hall (2012) também verificaram que o coeficiente de

amortecimento aumenta de acordo com crescentes teores de borracha na mistura. Rahman et al. (2001) e Mahendrakumar; Syathabuthakeer; Mohanram (2014) obtiveram valores na ordem de 0,001 para o concreto convencional.

#### **4.4 Análise da microestrutura interna dos concretos**

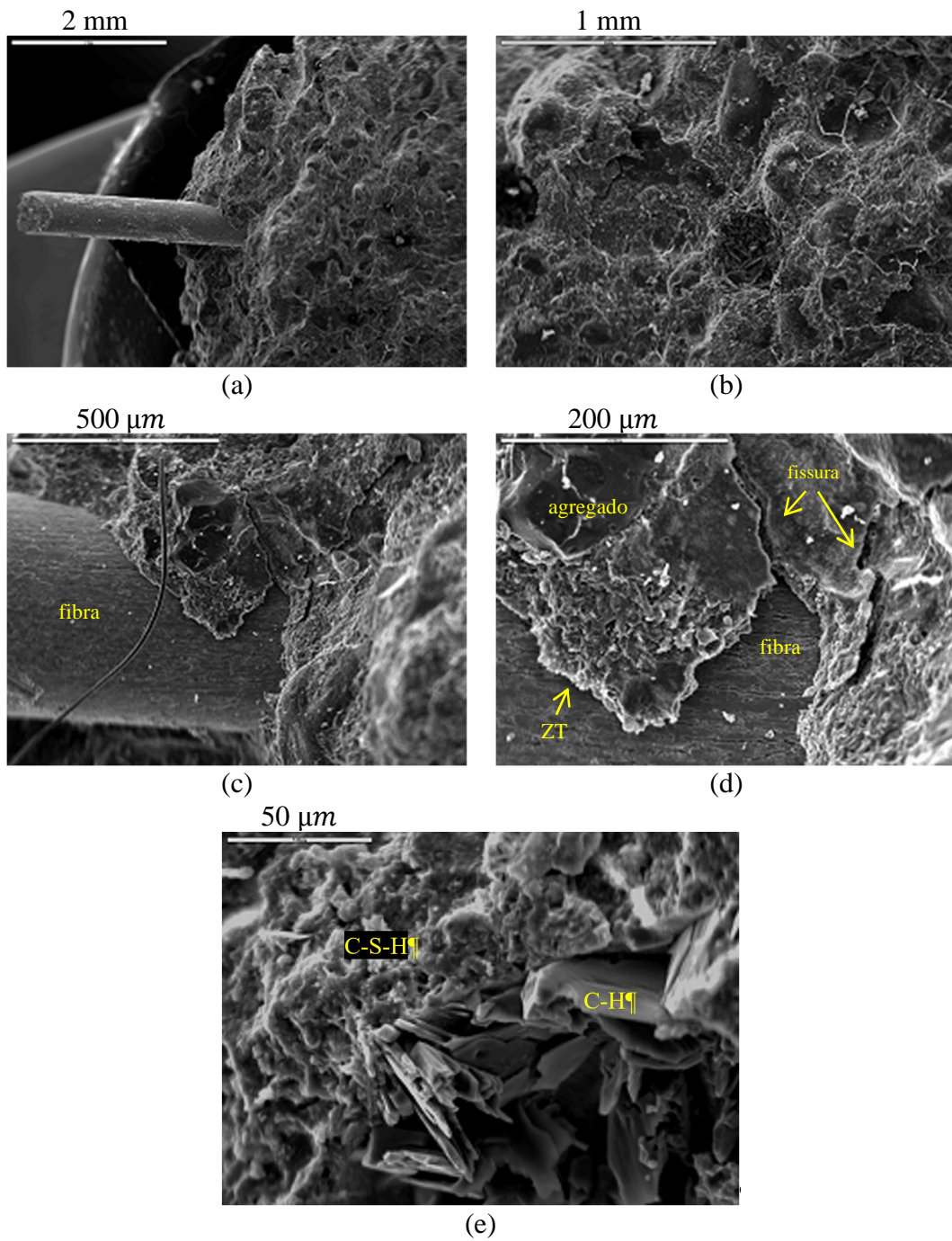
A análise da estrutura interna dos compósitos com base cimentícia é de suma importância para o entendimento do seu comportamento, da compreensão da aderência entre pasta e agregados, e para sugestões de melhoria de características destes concretos. As imagens das microestruturas dos CAA foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

De acordo com a Tabela 21, para a análise da microestrutura, esta subdividiu-se em dois grupos:

- os traços T1, T2, T3 nos quais foram empregados 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço; e
- os traços R1, R2, R3 nos quais foram empregados 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço, destacando que para T3, o consumo de borracha foi de 18 kg/m<sup>3</sup> de borracha e para R3 foi de 9 kg/m<sup>3</sup>.

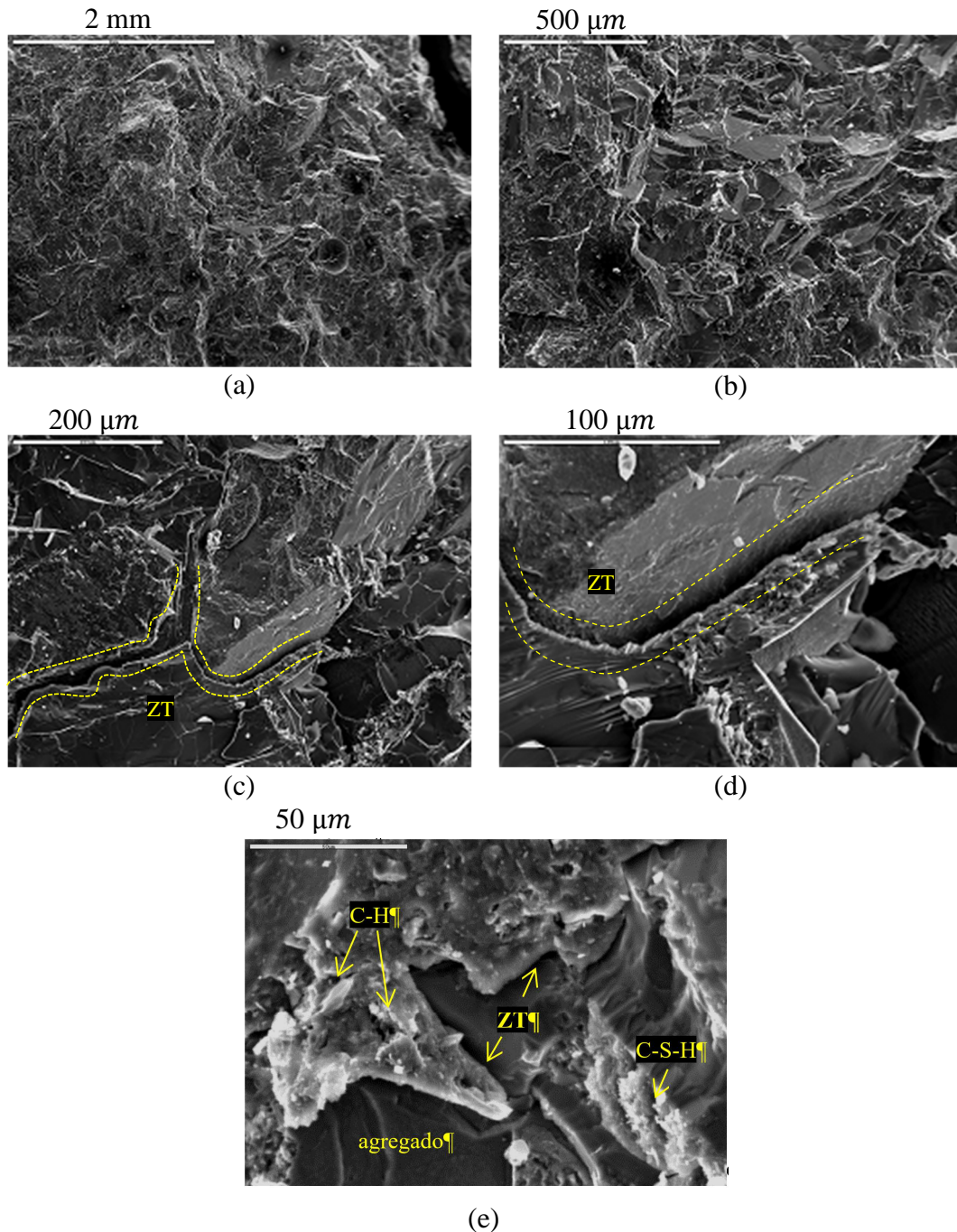
Na Figura 40 estão as micrografias do traço T1 e na Figura 41 estão as micrografias do traço R1. Suas microestruturas apresentam estruturas densas das matrizes das pastas de cimento, placas hexagonais de hidróxido de cálcio e evidência de produtos hidratados C-S-H. Isto justifica as boas propriedades mecânicas para estes traços, cuja resistência à compressão está na ordem de 70-73 MPa. Zhu et al. (2019) também notaram as mesmas características para o concreto sem borracha, sendo: microestrutura densa, com pequeno volume de vazios, sem poros grandes.

Figura 40: MEV do concreto autoadensável de traço T1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 41: MEV do concreto autoadensável de traço R1.



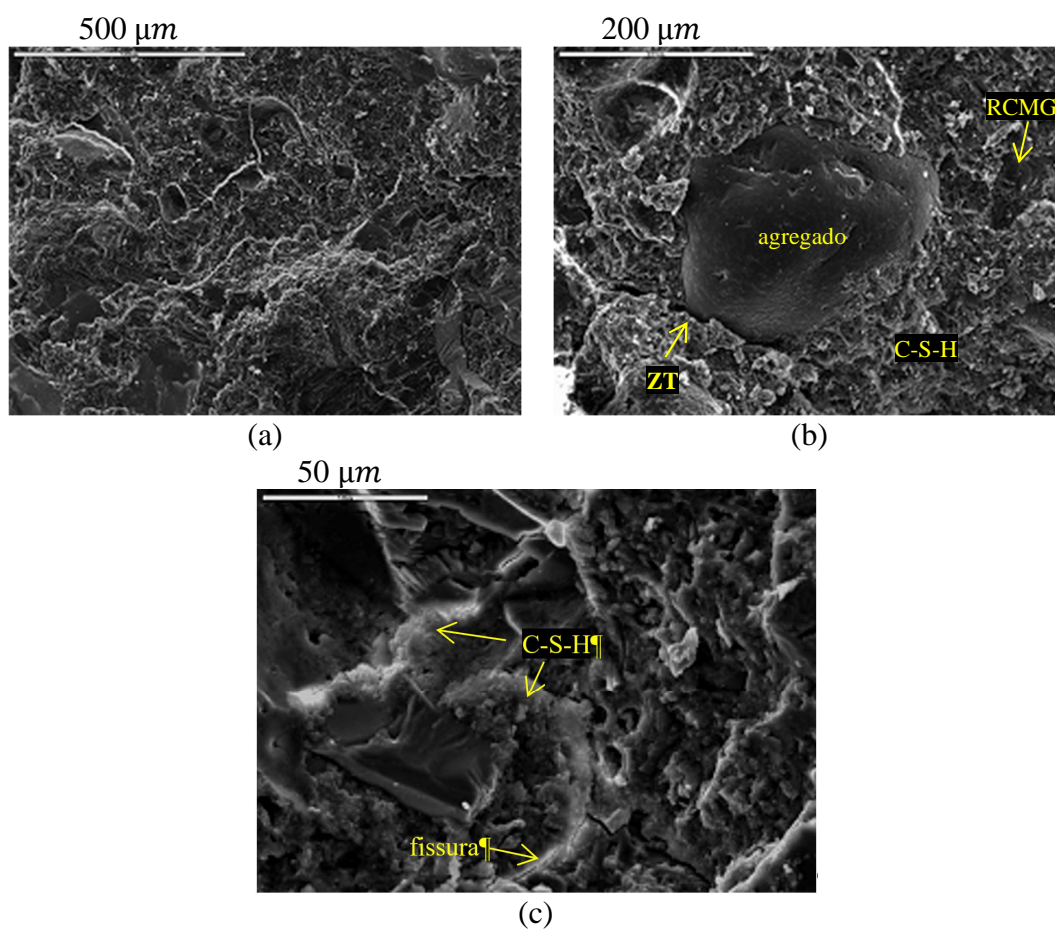
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 42 estão as micrografias do traço T2 (com 20 kg/m<sup>3</sup> fibras, pó de mármore e granito, sem borracha) e na Figura 43 estão as micrografias do traço R2 (com 10 kg/m<sup>3</sup> fibras, pó de mármore e granito, sem borracha). Comparando T2 e R2 aos traços T1 e R1, nota-se uma microestrutura interna mais compacta e mais densa, com melhor empacotamento das partículas, devido à incorporação do pó de mármore e granito, bem como pequenos vazios na matriz de cimento, que corroboram com menor índice de vazios e absorção de água. Também é possível

verificar que a fibra de aço se encontra completamente envolta pela matriz, apresentando sutil zona de transição (ZT). Essas evidências justificam os valores de resistência à compressão (73 MPa), à tração (7 MPa) e módulo de elasticidade (40 MPa).

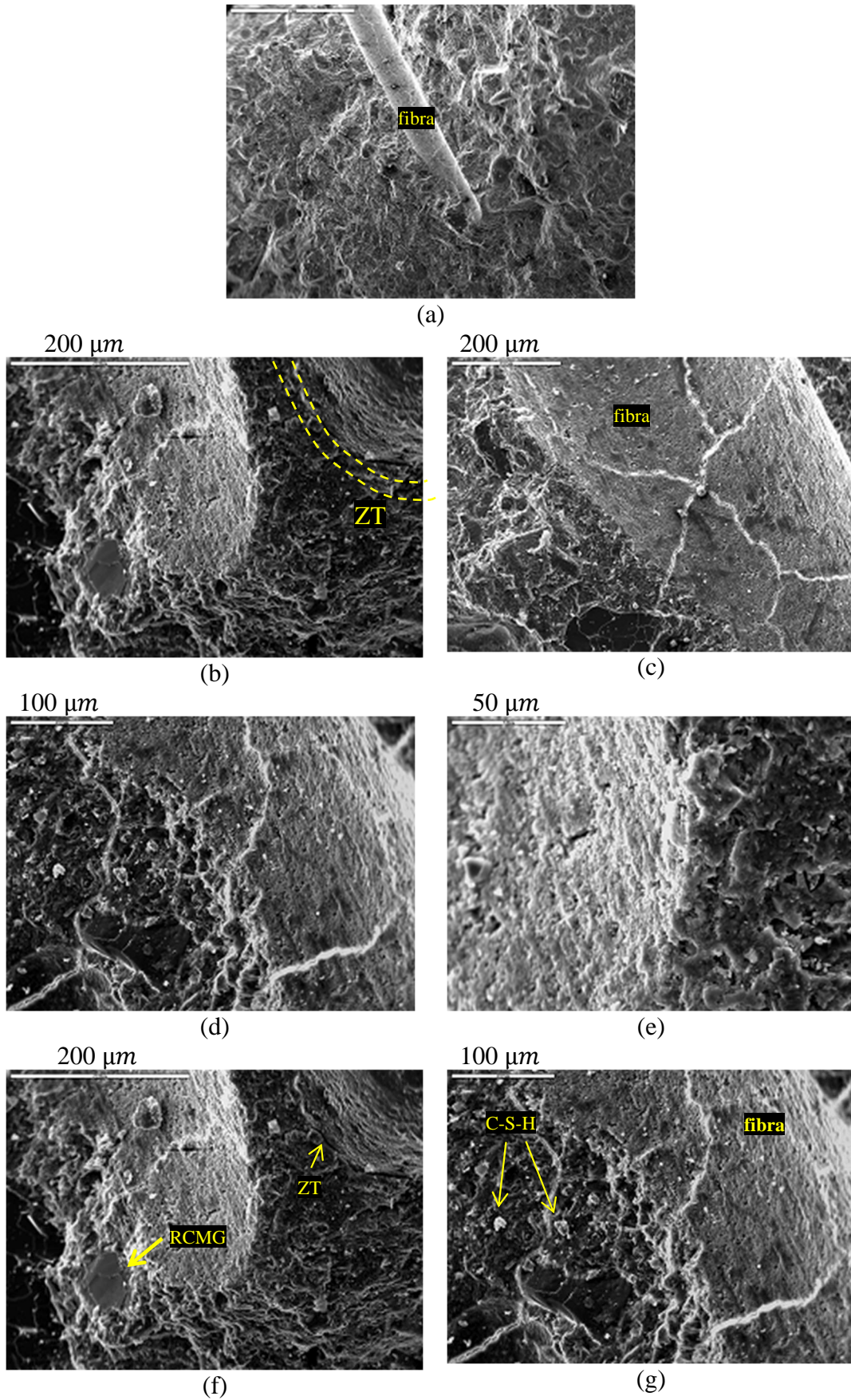
Xavier (2018) verificou que, com o aumento do teor de adição de mármore e granito no CAA, a zona de transição fica menos evidente e a pasta de cimento mais densa. Alyousef et al. (2018) confirmaram que até  $100 \text{ kg/m}^3$  de resíduo de mármore no CAA, a microestrutura é menos porosa que o concreto convencional.

Figura 42: MEV do concreto autoadensável de traço T2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 43: MEV do concreto autoadensável de traço R2.  
2 mm



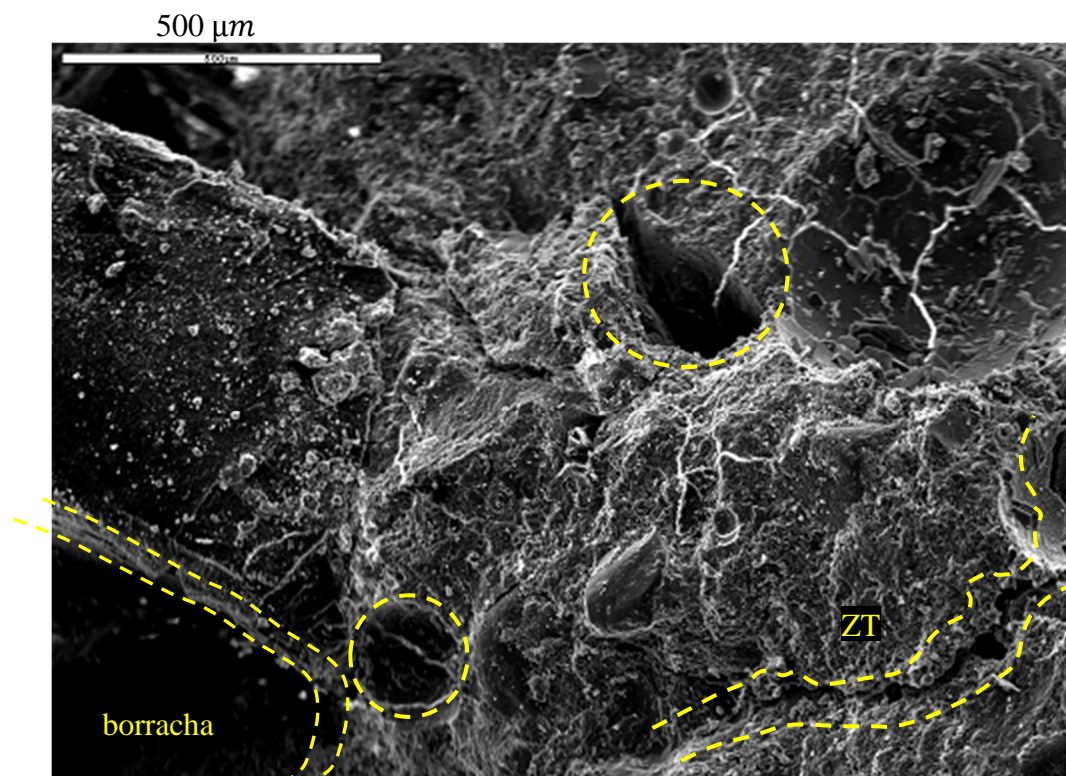
Fonte: Próprio autor.



Na Figura 44 estão as micrografias do traço T3 (com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras, pó de mármore e granito, borracha) com zona de transição evidenciada e grandes vazios. Na Figura 45 estão as micrografias do traço R3 (com 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras, pó de mármore e granito, borracha). Comparando-se T3 e R3 aos traços T1 e R1, nota-se uma menor resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade que os demais traços. Isso ocorre devido à incorporação do resíduo de borracha e conseqüentemente de ar, tornando a matriz mais porosa. Soma-se a este fato, a fraca aderência entre a pasta de cimento e partículas de borracha, causando o enfraquecimento da matriz. Verifica-se nas Figuras 44 e 45, a microestrutura da pasta de cimento aberta com propagação de fissuras, zona de transição evidente, aumento do volume de vazios de grande dimensão. Estas imagens justificam os maiores valores de índice de vazios e absorção de água para estes traços. Comparando ainda o traço T3 com traço R3 observa-se uma redução no número de vazios na microestrutura do traço R3, justificando o maior valor para a resistência à compressão do traço R3 (62 MPa) em comparação ao T3 (45 MPa)

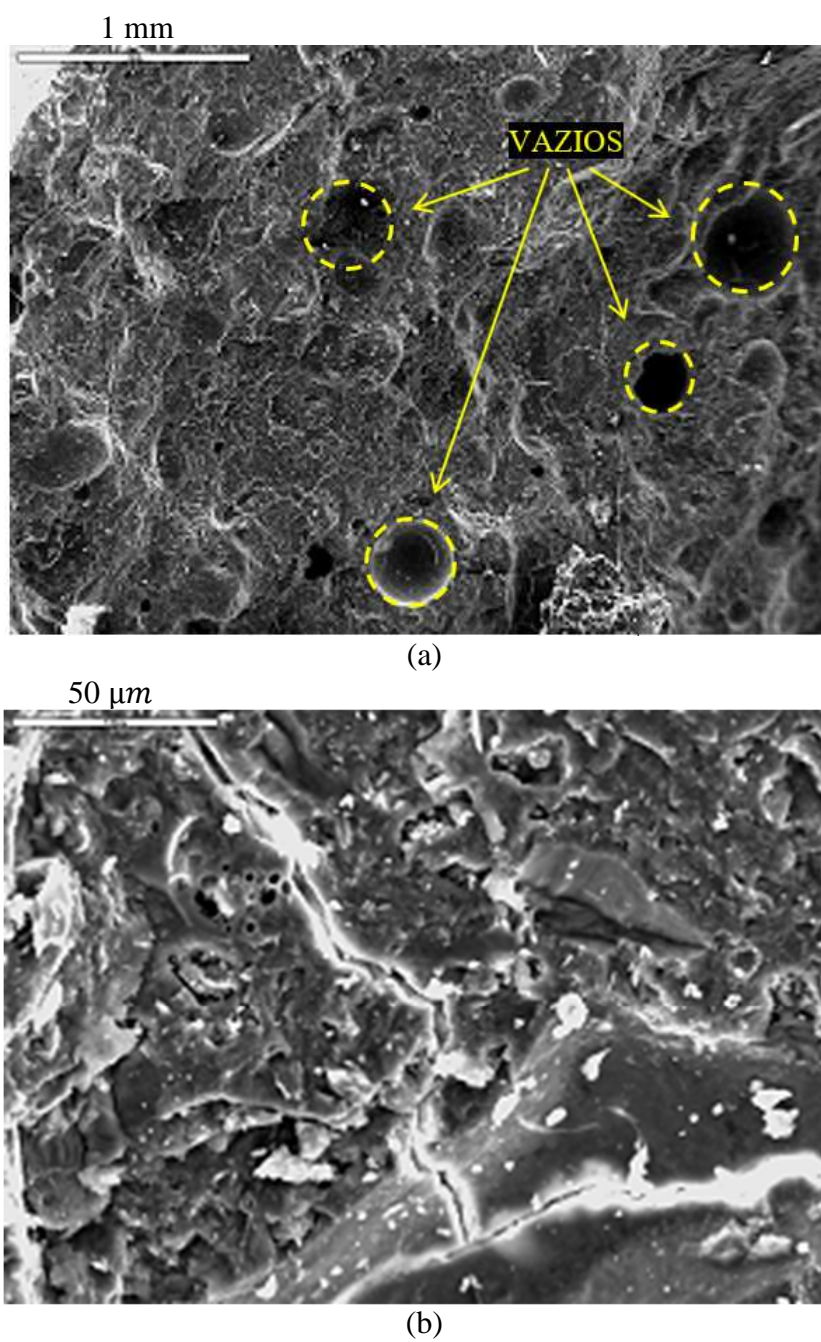
As mesmas características quanto à microestrutura, para concretos contendo borracha, foram encontradas por Angelin et al. (2019), Silva et al. (2019), Zhu et al. (2019), Gupta; Chaudhary; Sharma (2014); Da Silva et al. (2015).

Figura 44: MEV do concreto autoadensável de traço T3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 45: MEV do concreto autoadensável de traço R3.



Fonte: Próprio autor.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões

Nesta pesquisa avaliou-se a influência da incorporação de resíduos de mármore e granito, borracha e fibras de aço na produção de CAA. Foram moldados seis traços de CAA os quais foram submetidos a ensaios mecânicos e verificadas suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Pode-se concluir:

(a) quanto às propriedades no estado fresco dos concretos autoadensáveis verificou-se que, quanto a medida do espalhamento, todos os traços ensaiados atenderam aos limites das especificações brasileiras onde o limite mínimo é de 550 mm e o máximo de 850 mm. As misturas contendo pó de mármore e granito e borracha apresentaram maior coesão que as demais;

(b) quanto ao ensaio que mede a habilidade passante pelo método do anel J, para todas as misturas os valores foram iguais ou inferiores a 25 mm, indicando boa capacidade passante do concreto por obstáculos;

(c) quanto ao ensaio que mede a habilidade passante pela caixa L, que está relacionada a capacidade do concreto passar por obstáculos, este foi atendido pelos traços R1, R2, R3, devido à menor quantidade de fibras de aço incorporada na mistura;

(d) quanto à viscosidade do concreto autoadensável medida pelo Funil V, todas as misturas são adequadas para a produção de elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos;

(e) quanto às propriedades no estado endurecido dos concretos, verificou-se que, para a resistência à compressão, todos os traços estudados foram classificados como concreto estrutural segundo a ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015a). Com exceção do traço T3, as demais composições de CAA também foram classificadas como concretos de alta resistência tomando-se por base a norma brasileira. Os valores para a resistência à tração dos traços estudados apresentaram menores reduções comparando com os apresentados nos ensaios de resistência à compressão para cada traço. Todos os traços estudados podem ser utilizados na fabricação de bases de máquinas-ferramenta;

(f) o módulo de elasticidade estático para os traços T1 e T2 são muito próximos, o que também acontece para os traços R1 e R2. O módulo de elasticidade dinâmico apresenta valores

na faixa de 10% a 13% maiores que o módulo de elasticidade estático. A tendência quanto aos valores encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico é a mesma que para o estático, sendo que os traços sem borracha apresentam valores muito próximos entre si e a maior variação acontece para os traços com borracha. Para os traços com borracha a diminuição desta propriedade indica concretos “mais dúcteis” com maior fator de amortecimento, na faixa de 0,00353 a 0,00378. Valores estes superiores ao dado para o aço e ferro fundido, materiais tradicionalmente empregados na fabricação de bases de máquinas-ferramenta; e

(g) há de se considerar os benefícios ambientais advindos do reuso dos resíduos de pó de mármore e granito, e borracha na elaboração de concretos, que de outro modo, provavelmente seriam depositados em aterros devidamente licenciados; porém, não sem representar um passivo ambiental para as próximas gerações. Essa prática vai ao encontro do desenvolvimento sustentável como definido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil e Resolução nº 416 (CONAMA, 2009).

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, recomenda-se aprofundar os estudos nos seguintes pontos:

- Desenvolvimento de diferentes traços variando-se o teor de fibras de aço e de borracha;
- Realizar o tratamento superficial da borracha para remover as impurezas e aumentar a aderência entre pasta de cimento e a borracha;
- Avaliação da viabilidade econômica do CAA contendo fibras de aço e resíduos de mármore e granito e borracha aplicados a construção de bases de máquinas-ferramenta.

## CAPÍTULO 6 – 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.077>

ABRISHAMBAF, A.; BARROS, J. A. O.; CUNHA, V. M. C. F. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research*, v. 51, p. 57-66, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.009>

AITCIN, P. C. *Concreto de Alto Desempenho*. 1.ed., 667p, São Paulo: Pini, 2000.

AKASAKI, J. L. et al. Performance of simple concrete pipes produced with the incorporation of rubber tires. *Revista de Ingeniería de Construcción (En línea)*, v. 31, p. 27-36, 2016.

ALLAM, M. E.; BAKHOUM, E.S.; GARAS, G.L. Re-use of granite sludge in producing green concrete. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, p. 2731-2737, 2014.

ALENCAR, Ricardo dos Santos Arnaldo de. *Dosagem do concreto auto-adensável : produção de pré-fabricados / R.S.A. de Alencar*. – São Paulo, 2008. 179 p. Dissertação (Mestrado) – Edição Revisada – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

ALENCAR, C. R. A. INSTITUTO EUVALDO LODI. *Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais*. Instituto Euvaldo Lodi – Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013. 242 p.

ALMEIDA, S. F.; HANAI, J. B. Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 10, n. 44, p. 49-66, 2008.

ALIABDO, A. et al. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 28-41, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>

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. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0655>

ALFERES FILHO, R. Avaliação da influência do direcionamento de fibras de aço no comportamento mecânico de concreto autoadensável aplicado em elementos planos. Dissertação de M.sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ALYOUSEF et al. Study of the effects of marble powder amount on the self-compacting concretes properties by microstructure analysis on cement-marble powder pastes. *Advances in Civil Engineering*, v. 2018, ID 6018613, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6018613>

ALSAIF, A. et al. Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 533-543, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010>

ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GALVEZ, J. C. Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 85, p. 182-194, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.007>

AL-TAYEB et al. Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 284-289, 2013.

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, v. 144, p. 192-202, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>

ANGELIN, A. F. et al. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 525-536, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.166>

ANGELIN, A. F.; GACHET-BARBOSA L. A.; LINTZ, R. C. C. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 11, p. 76-94, 2018.

ANGELIN, A. F. et al. Rubberized mortar: The influence of aggregate granulometry in mechanical resistances and acoustic behavior. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 248-254, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.123>

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.

ASLANI, F. Experimental and numerical study of time-dependent behaviour of reinforced self-compacting concrete slabs. Tese (Doutorado) - School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology, Sydney, 2014.

ASLANI, F. Mechanical properties of waste tire rubber concrete mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, p. 04015152, 2016. <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001429>

ASLANI, F.; KELIN, J. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 1009-1025, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.323>

ASLANI F. et al. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1835-1847, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>

ASLANI, F. et al. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 553-566, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>

AN, X. H.; JIN, F.; SHI, J. J. Experimental study of self-compacting concrete filled prepacked rock. *Concrete*, v.1, p. 3-6 (in Chinese), 2005.

ASHISH, D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, v. 15, p. 236-242, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.024>

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR NM 23: Cimento portland – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001a). NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001b). NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004a). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004b). NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004c). NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009a). NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009b). NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009c). NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009d). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009e). NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009f). NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015a). NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015b). NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015c). NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017a). NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017b). NBR 15823-1: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017c). NBR 15823-2: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro.



Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017d). NBR 15823-3: Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017e). NBR 15823-4: Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017f). NBR 15823-5: Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017g). NBR 15823-6: Concreto autoadensável. Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017h). NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018a). NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018b). NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018c). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.

ASTM E1876-15: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

ASTM C215-14: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118450>

BACHMANN H. et al. *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Second ed. Berlin: Birkhäuser Verlag, 1997.

BENAZZOUK, A. et al. Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, p. 732-740, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.001>

BEZERRA, F. D. ROCHAS ORNAMENTAIS. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE. *Caderno Setorial ETENE*, ano 3, nº 60, dezembro, 2018.

BIDECCI, A. et al. Fracture energy and mechanical characteristics of self-compacting concretes including waste bladder tyre. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 669-678, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.191>

BILESKEY, P. et al. Módulo de elasticidade estático versus módulo de elasticidade dinâmico. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves-RS. São Paulo: IBRACON, v. 1. p. 1-13, 2017.

BITTENCOURT, R. M. et al. Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto/2013, Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia, 2014.

BOCCIARELLI, M. et al. Long-term behavior of self-compacting and normal vibrated concrete: experiments and code predictions. *Construction and Building Materials*, v. 168, p. 650-659, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.139>

BOUKHELKHAL et al. Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 30, p. 2405-2419, 2016. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1184402>

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2009) Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento. Relatório Técnico 33. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 101 p.

BRESSAN, T. M. S. et al. Comparison of different chemical additives in the physical and mechanical performances of the self-compacting lightweight concrete(SCLC). In: 61 Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza-CE. São Paulo: IBRACON, v. 1. p. 1-14, 2019.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 8110-2: 1985 – Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. London, UK. 2001.

BUŠIĆ, R. et al. Recycled Rubber as an Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete – Literature Overview. *Materials*, v. 11, p. 1729, 2018.

CANESSO, F. A. C. et al. Módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 18º, 2008, Porto de Galinhas – PE, Anais, pp. 941-951.

CARNEIRO et al. Propriedades de blocos de concreto com adição de borracha de pneu referente à resistência e à durabilidade. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió – AL. São Paulo: IBRACON, v. 1. p. 1-16, 2012.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica*, São Paulo, v. 55, No. 335, 2009, pp. 233-251.

CAVALCANTI, D. J. H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. Dissertação (Mestrado) – Centro de

Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, p. 313-332, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>

CHIODI FILHO (2019). O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais. ABIROCHAS, outubro/2019. [http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Producao\\_Brasileira\\_Lavra\\_2018d.pdf](http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Producao_Brasileira_Lavra_2018d.pdf). Acesso em 27/02/2020.

CHIODI FILHO (2018). O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais. Informe 05/2018. ABIROCHAS. [http://abirochas-novembro.institucional.ws/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe\\_05\\_2018\\_Setor\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_c.pdf](http://abirochas-novembro.institucional.ws/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_05_2018_Setor_de_Rochas_Ornamentais_c.pdf). Acesso em 27/04/2020.

CHOUDHARY, R.; GUPTA, R.; NAGAR, R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 239, p. 117888, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117888>

CUENCA, E.; SERNA, P. Failure modes and shear design of prestressed hollow core slabs made of fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, v. 45, p. 952-964, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.005>

CUENCA, E.; ECHEGARAY-OVIEDO, J.; SERNA, P. Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of self-compacting fiber reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, v. 75, p. 135-147, 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.01.037

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

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>

DAWOOD, E. T.; RAMLI M. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers. *Construction and Building Materials*, v. 28, p. 193-200, 2012.

DIETERLE, R., BANCHMANN, H. Experiments and Models for the Damping Behaviour. *International Association for Bridge and Structural Engineering Report of the Working Comissions*, v. 34, p. 69-82, 1981.

DOMONE, P. L.; A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* v.29, 2007.

DUCATTI, V. A., SANTOS, J. M., LINTZ, R. C. Comparative study with alternative materials for manufacture of machine tool structures. In: *Proceedings of International Symposium Polymers In Concrete ISPI 2006*, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2006.

DUNAJ, P.; BERCZYŃSKI, S.; CHODŹKO, M. Method of modeling steel-polymer concrete frames for machine tools. *Composite Structures*, v. 242, p. 112197, 2020.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. Specification and guidelines for self-compacting concrete. London, Fevereiro, 2002.

EFNARC – The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, p. 63, 2005.

EISA, A.S.; ELSHAZLI, M.T.; NAWAR, M.T. Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, v. 252, 119078, 2020.

ELCHALAKANI, M. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, v. 1, p. 20-38, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2014.06.001>

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, v.2, p.1327-1366, 2011.

FRONZA, R. Estudo de piso intertravado de concreto com resíduo de borracha de pneus inservíveis visando a redução de consumo de cimento. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira, 2016.

FUENTE, A. et al. Experiencies in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 27, p. 60-71, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Guia técnico ambiental da indústria de rochas ornamentais / Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM; FIEMG, 2015. 60p.  
[http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO\\_SUSATENTAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/guia-rochas.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO_SUSATENTAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/guia-rochas.pdf).

GRAFT-JOHNSTON, J. W. S.; BAWA, N. S. Effects of Mix Proportion, Water– Cement ratio, Age and Curing Conditions on the Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. *Building Science*, v. 3 p. 171-177, 1969. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(69\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0007-3628(69)90028-0).

GESOGLU, M. et al. Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 160-170, 2012.

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, Volume 201, p. 447-460, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.172>

GOKULNATH, V.; RAMESH, B.; SIVASHANKAR, S. Influence of M sand in self compacting concrete with addition of steel fiber. *Materials Today: Proceedings*, v. 22, p. 1026-1030, 2020.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 1 ed. São Paulo: PINI, 2009.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1878-1887, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.015>

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.

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.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>

HAACH, V. G. et al. Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT&E International*, v. 59, 2013, pp. 18-24.

HAMEED A. et al. Self compacting concrete: use of waste marble powder as filler material. *Pak. J. Engg. & Appl. Sci.*, v. 18, p. 1-10, 2016.

HEITMANN, H.; VENKATRAMAN, V. Investigation on the Use of Prestressed and Reinforced Concrete as Material for Machine Tool Structures. In *Proceedings of the 4 th All India Conference on Machine Tools Design and Research*, IIT Madras, India, 1970, pp. 287-299

HESAMI, S.; HIKOUEI, I. S.; EMADI, S. A. A. Mechanical behavior of selfcompacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 228-234, 2016.

HILAL, N. N. Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 6, p. 191-206, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbe.2017.03.001>

HUYNH, T-P; HWANG, C-L; LIMONGAN, A. H. The long-term creep and shrinkage behaviors of green concrete designed for bridge girder using a densified mixture design algorithm. *Cement and Concrete Composites*, v. 87, p. 79-88, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.004>

IBAMA (2019) – Relatório de pneumáticos: Resolução Conama nº 416/2009.

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

ISMAIL, M. K.; HASSAN, A. A. A. Impact Resistance and Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete Reinforced with Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, p. 04016193, 2017. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001731

ISO 13320 (2009): Particle size analysis – Laser diffraction methods. Geneva.

- JEN, G.; TRONO, W.; OSTERTAG, C.P. Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: development, properties and composite behavior. *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 63-71, 2016.
- KAMAL, H. K.; SCHUTTER, G. D. Mechanical properties of self-compacting concrete. *RILEM State-of-the-Art Reports*, v. 14, USA, 2014.
- KANE, JOHN F., Polymer Concrete Machine Tool Components, International Congress on Polymers in Concrete, North American Workshop, San Francisco, Sept. 1991.
- KEFELEGN, A.; GEBRE, A. Performance of self-compacting concrete used in congested reinforcement structural element. *Engineering Structures*, v. 214, p. 110665, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110665>
- KOBLISCHEK, P. J. MOTEMA - acrylic concrete for machine tool frames. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 7, n 1, 1985.
- KRISTIAWAN, S. A.; ADITYA, M. T. M. Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete. *Procedia Engineering*, v. 125, p. 705-712, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.110>
- KUSHNIR, E.; PATEL M.R.; SHEEHAN T. M. Material Consideration in Optimization of Machine Tool structure, Proc. of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-16, New York, NY.
- LI, N. et al. Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: A comprehensive study. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, p. 117707, 2019.
- LYNDON, F. D.; BALENDRAN, R. V. Some observations on elastic properties of plain concrete, *Cement and Concrete Research*, v.16, n. 3, pp. 314-24, 1986.
- LISBÔA, E. M. Obtenção do Concreto Autoadensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudos de Propriedades Mecânicas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- LOUKILI, A. *Self-compacting concrete*, 1 ed. London:ISTE, 2011.
- LU, X. et al. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 231–239, 2013.
- MAHENDRAKUMAR, N.; SYATHABUTHAKEER, S.; MOHANRAM, P. V. Study of Alternative Structural Materials for Machine Tools. In: 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), Guwahati, Assam, India, 2014. <http://www.iitg.ac.in/aimtdr2014/PROCEEDINGS/papers/645.pdf>
- MANIKANDAN, M.; FELIXKALA, T. Experimental study on properties of granite waste in self compacting concrete. *Indian Journal of Applied Research*, v. 5, p. 128-130, 2015.

MASHALY, A. O. et al. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks, *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 731-741, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.

MCKEOWN, P. A. et al. Ultra-precision, high stiffness CNC grinding machines for ductile mode grinding of brittle materials. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v. 56, p. 806-814, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MESQUITA, E. F. T. et al. Avaliação das propriedades reológicas da pasta auto-adensáveis com incorporação de resíduos de serragens de rochas ornamentais. In: IX ENICIT – Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica, Fortaleza-CE, 2009.

MEESIT, R.; KAEWUNRUEN, S. Vibration characteristics of micro-engineered crumb rubber concrete for railway sleeper applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 15, p. 55-66, 2017.

MÖHRING, H-C.; BRECHER, C.; ABELE, E.; FLEISCHER, J.; BLEICHER, F. Materials in machine tool structures. *CIRP Ann*, v. 64, p. 725-748, 2015.

MONTANI, C. XXV Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo. Congiuntura internazionale, Produzione, Scambi, Consumi, Tecnologie, Beni strumentali, Schede dei Paesi leader. Carrara: Aldus, 2014.

MONTANI, C. XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2018. Aldus: Carrara, 2018. 263 p.

MONTIJA, F. C. Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto. 2007. 261 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MORAES, I. *Mármore e Granito: Lavra, beneficiamento e Tratamento de Resíduos*, 2006.

MORREL, R. Measuring Elastic Properties of advanced Technical Ceramics – A review. UK National Physical Laboratory Report, n 42, 41 p, 1996.

MORREL, R. NPL Measurement Good Practice Guide – Elastic Module Measurement. UK National Physical Laboratory Report, n 98, 100 p, 2006.

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 521-530, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete International*, v. 19, p. 50-54, 1997.

OLIVEIRA, L. S. Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos cimentícios. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2015.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso, 2017.

PEREIRA, A. H. A. et al. Algoritmo para determinação do amortecimento de materiais cerâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração via excitação por impulso, *Cerâmica* v. 58, p. 229-237, 2012.

PFEIFER et al. Reutilização de resíduos de pneu em argamassa colante. In: 57 Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito - MS. São Paulo: IBRACON, v. 1. p. 1-12, 2015.

POPOVICS, S. Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials. *Mat. Constr.* 8, 183–191 (1975).

POVEDA, E. et al. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC. *International Journal of Fatigue*, v. 101, p. 9-17, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.04.005>

PUSKAR, A. Internal friction of materials, Cambridge Int. Sci. Publ., Cambridge, Inglaterra (2001) 342p.

RAHMAN, M. et al. Development of a polymer impregnated concrete damping carriage for linear guideways for machine tools. *Int J Mach Tools Manuf* 41:431-441, 2001.

RAHMAN, M.; MANSUR, M. A.; CHUA, K. H. A study on the application of cementitious materials for machine tool structures. *Bull Japan Soc Precis Eng Japan* 23:94-99, 1989.

RAHMAN, M.; MANSUR, M. A. Fibre reinforced concrete - a new material for machine tools. *Int J of the Japan Soc Precis Eng*, 26:183-188, 1992.

Rana, A.; Kalla, P.; Csetenyi, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*. v. 94, p. 304-311, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.053>.

RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. 4ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RAO, N. S. V. K. Foundation Design: Theory and Practice. 1ª Edição, Wiley, 2011.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável: características e aplicação. Revista Técnica, 135 ed. São Paulo: PINI, 2008.

REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, v. 2., p. 1769-1806, 2011.



Resolução Nº 416, CONAMA, 2009 – "Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências." - Data da legislação: 30/09/2009 - Publicação DOU Nº 188, de 01/10/2009, págs. 64-65

ROCHA JÚNIOR, A. J. et al. Avaliação de piso tático de concreto com agregados reciclados de pneus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58., 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo horizonte: IBRACON, 2016. p.1-10.

RODRIGUES, R.; BRITO, J.; SARDINHA. M. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*, v. 77, p. 349-356, 2015.

RUIZ, G. et al. Dynamic mixed-mode fracture in SCC reinforced with steel fibers: an experimental study. *International Journal of Impact Engineering*, v. 129, p. 101-111, 2019.

SABAU, M.; POP, I.; ONET, T. Experimental study on local bond stress-slip relationship in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, v. 49, p. 3693-3711, 2016.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 19-32, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>

SANTOS, A. C. Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SARTORTI, A. L. Comportamento Dinâmico de Lajes Maciças de Concreto Leve com Pérolas de EPS. Tese EESC, São Carlos, 2015.

SERNA, P. et al. Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain. *Materials and Structures*, v. 42, p. 1233-1246, 2009.

SI, R. et al. Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, v. 180, p. 823-831, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.180>

SIDDHPURAA, M.; PAUROBALLYA, R. A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 61, p. 27-47, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview *Waste Management*, v. 24, p. 563-569, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.006>

SHMIDT, I. V.; DEGTYAREVA, A. S. Development and Testing of Concrete Mix for Machine Tool Base Elements. *Procedia Engineering*, v. 206, p. 1215-1220, 2017.

SHIMOSAKA, T. J. INFLUÊNCIA DO TEOR DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS DE AÇO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS. Dissertação Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, PR, 2017.

SILVA, C. W. Vibration damping, control, and design, Taylor & Francis Group, Vancouver, Canada (2007) 634p.

SILVA, F. M. Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira, 2014.

SILVA JUNIOR, F. A. Avaliação do efeito da adição do resíduo de borracha de pneu a brita calcária na formação de compósitos cimentícios. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, F. M. et al. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). *Matéria-RJ*, v. 22, p.e11778, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0110>

SILVA, F. M. et al. The use of tire rubber in the production of high-performance concrete. *Cerâmica*, v. 65, p. 110-114, 2019. <https://doi.org/10.1590/0366-6913201965s12598>

SORELLI, L.; MEDA, A.; PLIZZARI G. A. Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter. *ACI Structural Journal*, v. 103, p. 551-558, 2006.

STOETERAU, R. L. Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas, Editora da UFSC, 2004.

SU, N.; HSU, K. C.; CHAI, H. W. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 1799-1807, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00566-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-X).

SUGAPRIYA, P.; RAMKRISHNAN, R. Crumb rubber recycling in enhancing damping properties of concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 310, Article 012013, 2018.

SWAMY, S. S. et al. Experimental studies on compression and vibration characteristics of granite epoxy – an alternative material for precision machine tool beds. *International journal of pure and applied research in engineering and technology*, v. 2, p.120-135, 2014.

TAHA, M. M. R. et al. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, p. 640-649, 2008.

TAJI, I. et al. Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. *Journal of Cleaner Production*, v. 210, p. 837-846, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.091>.

TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Thermal effect of marble and tile fillers on self-compacting concrete behavior in the fresh state and at early age. *Journal of Building Engineering*, v. 20, p. 1-7, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.06.015>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>

THORBY, D. *Structural Dynamics and Vibrations in Practice – An Engineering Handbook*, Elsevier Ltd., Oxford, Inglaterra (2008) 420p.

TOPÇU, İ. B.; BILIR, T.; UYGUNOĞLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 1947-1953, 2009.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. . *Concreto autoadensável*. 2. ed. São Paulo: PINI, 2015.

TRENTIN, T. F. S. et al. Use of tire rubber residue in reinforced concrete pipes. *Key Engineering Materials (Online)*, v. 668, p. 283-289, 2015.

VARDHAN, K. et al. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 615-621, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071>

VAIDEVI, C.; KALA, T. F.; KALAIYARRASI, A.R.R. Mechanical and durability properties of self-compacting concrete with marble fine aggregate. *Materialstoday: Proceedings*, v. 22, p. 829-835, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.019>

VASCONCELOS, A. R. B. *Análise experimental da durabilidade de concretos de alto desempenho com adição de resíduo de borracha de pneu e cinza da casca de arroz*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

VERZEGNASSI, E. *Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira, 2015.

VIGNJEVIC, R. et al. Modelling of strain softening materials based on equivalent damage force. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 335, p. 52-68, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.01.049>

XAVIER, B. C. et al. Evaluation of the physical and mechanical properties of self-compacting concrete with the addition of marble and granite beneficiation residue. In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu-PR. São Paulo: IBRACON, v. 1. p. 1-12, 2018.

XAVIER, B. C. *Comparação do concreto autoadensável com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito com o concreto autoadensável convencional*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira, 2019.

XAVIER, B. C. et al. Fresh and Hardened States of Distinctive Self-Compacting Concrete with Marble – and Phyllite-Powder Aggregate Contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, p. 04020065, 2020.

XIE, J. et al. Effects of the addition of silica fume and rubber particles on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete with steel fibres. *Journal of Cleaner Production*, v. 197, p. 656-667, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.237>

YIN, J.; ZHANG, J.; WANG, W. Effective resin content and its effect on the overall performance of polymer concrete for precision machine tools. *Construction and Building Materials*, v. 222, p. 203-212, 2019.

YOUSSEF, O. et al. An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials*, v. 53, p. 522-532, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>

YOUSSEF, O.; ELGAWADY, M. A.; MILLS, J. E. Experimental investigation of crumb rubber concrete columns under seismic loading. *Structures*, v. 3, p. 13-27, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.02.005>

YUNG, W. H.; YUNG, L.C.; HUA, L.H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 665-672, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>.

ZHENG, L.; HUO, X. S.; YUAN, Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22, p. 939-947, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.005>

ZHANG, S. J. et al. A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 91, p. 76-95, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.02.001>

ZHU, H.; WANG, Z.; XUA J.; HAN, Q. (2019) Microporous structures and compressive strength of high-performance rubber concrete with internal curing agent. *Construction and Building Materials*, v. 215, p. 128-134, 2019.

<http://www.usinagem-brasil.com.br/8035-perussi-chimin-retrofito-fresadora-portal-para-atgm/>. Acesso em: 15:04h dia 18-09-2020.

## ANEXO A

Nas Figuras 1 a 6 estão os registros dos ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

Figura 1: Ensaios no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço T1. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço T1.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2: Ensaio no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço T2. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço T2.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3: Ensaio no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço T3. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço T3.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4: Ensaio no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço R1. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço R1.



(a)

(b)



(c)



(d)



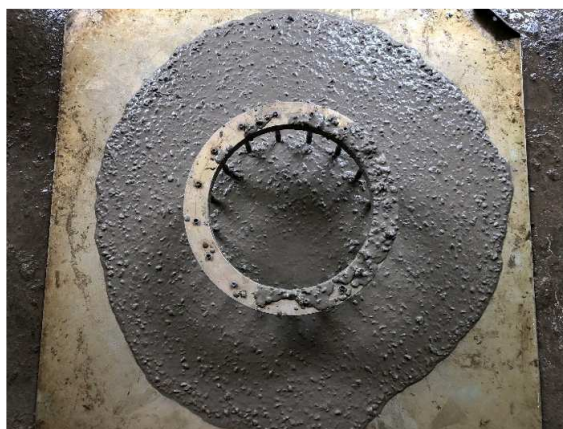
(e)



Figura 5: Ensaio no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço R2. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço R2.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6: Ensaio no estado fresco e corpos de prova moldados do CAA do traço R3. (a) Medida do espalhamento. (b) Medida da habilidade passante pelo anel J. (c) Medida da viscosidade pelo método do funil V. (d) Medida da habilidade passante pela caixa L. (e) Corpos de prova do traço R3.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Na Tabela 1 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de granulometria realizado no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Tabela 1: Resultados do ensaio de granulometria do pó de mármore e granito.

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>distribuição discreta (%)</b>	<b>distr. acum. (%)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>distribuição discreta (%)</b>	<b>distr. acum. (%)</b>
355	0,00	100,00	7,95	3,89	25,71
300	0,00	100,00	6,69	3,39	22,33
250	0,00	100,00	5,63	2,94	19,38
212	0,00	100,00	4,73	2,57	16,81
180	0,08	99,92	3,98	2,28	14,53
150	0,59	99,33	3,34	2,03	12,49
125	1,37	97,96	2,81	1,83	10,66
106	1,95	96,01	2,37	1,67	8,99
90	2,38	93,63	1,99	1,54	7,45
75	3,15	90,49	1,67	1,45	6,00
63	3,58	86,90	1,41	1,35	4,65
53	4,17	82,73	1,18	1,17	3,48
45	4,49	78,25	0,99	1,02	2,46
37,8	5,19	73,06	0,84	0,82	1,65
31,8	5,65	67,41	0,70	0,61	1,03
26,8	5,84	61,57	0,59	0,43	0,60
22,5	5,92	55,65	0,50	0,29	0,31
18,9	5,85	49,80	0,42	0,17	0,14
15,9	5,69	44,11	0,35	0,10	0,04
13,4	5,34	38,77	0,30	0,04	0,00
11,3	4,79	33,98	0,25	0,00	0,00
9,46	4,38	29,60	0,21	0,00	0,00