

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

LUCAS RAMON ROQUE DA SILVA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
COM RESÍDUO POLIMÉRICO**

ITAJUBÁ-MG

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

LUCAS RAMON ROQUE DA SILVA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
COM RESÍDUO POLIMÉRICO**

Defesa de Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Materiais para Engenharia

Área de concentração: Compósitos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo.

Coorientador: Prof. Dr. Vander Alkmin dos Santos Ribeiro.

ITAJUBÁ-MG

2020

DEDICATÓRIA

*“Nós somos aquilo que fazemos repetidamente.
Excelência, então, não é um modo de agir, mas
um hábito.”*

Will Durant

*“Only the disciplined ones are free in life. If you
are undisciplined, you are a slave to your
moods. You are a slave to your passions.”*

Eliud Kipchouge

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Nazaré Roque, meu pai Ivo José, meus familiares e amigos, pelo carinho, incentivo, apoio e compreensão durante esses anos de estudo.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI/Itajubá) pela oportunidade de estudo e pesquisa e por todo suporte técnico para a realização desta pesquisa de mestrado.

À Prof.^a Dr.^a Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo, pela valiosa e impagável orientação e amizade. Ao Prof. Dr. Vander Alkmin dos Santos Ribeiro por todo suporte, amizade e orientações.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil da UNIFEI, Fabiano e todos os pesquisadores mestrandos, doutorandos e pós-doutorado pelo apoio e auxílio técnico.

À empresa FOX pelo fornecimento do resíduo polimérico utilizados nesta pesquisa. À empresa SILICON Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

ROQUE-SILVA, L.R. (2020), Análise de propriedades do concreto autoadensável com resíduo polimérico. 2020. 156p. Dissertação (Mestrado em Materiais Para Engenharia). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2020.

Concreto depois da água é um dos materiais mais usado no mundo, e para sua obtenção há necessidade de usar insumos naturais que estão cada vez mais escassos. Os Resíduos Eletroeletrônicos, de equipamentos tais como: refrigeradores e *freezers* é a categoria de resíduos que mais cresce no mundo. Este trabalho visa avaliar uso de resíduo polimérico oriundo da reciclagem de refrigeradores na produção de concreto autoadensável (CAA) e sua influência nas propriedades no estado fresco e endurecido. Inicialmente foi produzido um traço referencia do CAA pelo método de Tutikian. Depois o agregado graúdo foi substituído em 5%, 10%, 15% e 20% pelo resíduo polimérico de refrigeradores. Foram avaliados no estado fresco o índice de estabilidade visual (IEV), espalhamento (*cone de Abrams*), *tempo de escoamento* (t_{500}), habilidade passante (*caixa L*), *viscosidade (funil V)* e massa específica fresca. No estado endurecido foram avaliados a resistência à compressão axial e diametral, absorção de água, índice de vazios, massa específica, módulo de elasticidade dinâmico, microscopia e resistividade elétrica. No estado fresco o CAA com resíduo mantém suas características de homogeneidade e fluidez até a substituição de 20% em massa. No estado endurecido, a substituição de RP por brita atuou de maneira a diminuir gradualmente a resistência do concreto nos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à compressão diametral. No entanto, mesmo com a diminuição, todos os traços são classificados para fins estruturais de média e alta resistência ABNT NBR 8953:2015. Com a substituição de RP o módulo de elasticidade diminui assim a rigidez. Na análise de MEV, pode se constatar que à medida que se aumenta a porcentagem de RP, a zona de transição na interfase (ZTI) fica porosa e sem coesão em diversos pontos, e há espaços de vazios significativos. Fatos esses somados que justificam o decréscimo das propriedades mecânicas do CAA. Por outro lado, a resistividade elétrica aumenta com substituição de RP, o tornando CAA mais isolante e menos propenso à deterioração pela atuação de íons. Pelos resultados obtidos, conclui-se que é possível a produção de CAA com substituição de até 20% em massa de RP pelo agregado graúdo.

Palavra-chave: concreto autoadensável, resistência mecânica, módulo de elasticidade, resíduos poliméricos, resíduo de eletrodoméstico, resistividade elétrica.

ABSTRACT

Concrete after water is the most used material in the world, and to obtain it there is a need to use natural inputs that are increasingly scarce. Electro-electronic waste, from equipment such as refrigerators and freezers, is the fastest-growing category of waste in the world). An alternative for the correct disposal of household appliance waste is its use in concrete as an aggregate, which generates concrete with special characteristics. This work aims to produce self-compacting concrete (CAA) modified with polymeric residues from the recycling of refrigerators and characterizes them in terms of their main properties. The physical, mechanical and microstructural characteristics were evaluated. One reference line was produced, without substitution of polymeric residue (RP) and four with substitution of (RP) with 5%, 10%, 15% and 20% by the coarse aggregate. In the fresh state, the tests were visual stability index (IEV), slump flow test (Abrams cone), flow time (t500), passing ability (box L), viscosity (funnel V) and fresh density. In the hardened state, the tests were resistance to axial and diametrical compression, water absorption, voids index, specific mass, dynamic elastic modulus, scanning electron microscopy (SEM) and electrical resistivity. In the fresh state, the CAA maintains its characteristics of homogeneity and fluidity until the replacement of 20%. In the hardened state, the addition of RP acted to gradually decrease the strength of the concrete in the tests of resistance to axial compression and resistance to diametrical compression. However, even with the decrease, all mix are classified for medium and high strength structural purposes ABNT NBR 8953: 2015. With the replacement of RP the modulus of elasticity decreases, thus the stiffness of the CAA decreases. The reverse occurs for the electrical resistivity that increases with RP replacement, making it CAA insulating and less prone to deterioration by the action of ions, less susceptible to the corrosion process that can occur in reinforced concrete. In the MEV test, it can be seen that as the percentage of PR increases, the transition zone in the interphase (ZTI) becomes porous and without cohesion at several points, and there are spaces of significant vacancies. These facts added up that justify the decrease in the mechanical properties of the CAA. From the results obtained, it is concluded that the production of CAA with substitution of RP by the coarse aggregate is possible.

Keyword: self-compacting concrete, mechanical resistance, elasticity module, polymeric waste, household appliance waste, microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da composição da mistura entre CAA e concreto convencional (Fonte: (OKAMURA e OUCHI, 2003).	7
Figura 2: Influência de três tipos de areia sobre a tensão de cisalhamento da mistura de CAA quando em movimento (Fonte: Okamura e Ouchi, 2003).....	10
Figura 3: Representação esquemática de: partículas de cimento Portland em pastas sem aditivos (a);com aditivos superplastificantes (b) e, com superplastificante e aditivo mineral de elevada finura (c) (Fonte: adaptado de CORDEIRO, 2006).....	13
Figura 4: Classes de índices de estabilidade visual adaptado de (Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017).	19
Figura 5: Módulo de elasticidade de CAA e CCV em função do teor de argamassa (Fonte: MANUEL, 2005).....	20
Figura 6: Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo (Fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003).	23
Figura 7: Concretagem de laje no Centro Comercial em Ferrara, Itália (Fonte: EFNARC, 2002).	23
Figura 8: Seção polida de uma amostra de concreto por microscópio óptico (Fonte: Adaptado de MEHTA E MONTEIRO, 2014).....	26
Figura 9: Comportamento tensão/deformação de uma amostra de metal submetida a crescente carregamento (Fonte: WILLIAN D. CALLISTER, 2002).....	28
Figura 10: Comportamento típico da curva tensão-deformação para o concreto e seus principais componentes. (Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	29
Figura 11: Diferentes formas de obtenção do módulo de Young a partir da curva tensão-deformação (Fonte: ALMEIDA, 2012).....	30
Figura 12: Sistema de eletrodos de chapas de cobre (Fonte: LAMOUNIER, 2014).....	33
Figura 13: Linhas de produtos do setor eletroeletrônico (Fonte: Adaptado de SARAIVA, 2014).	34
Figura 14: Crescimento do número de domicílios com geladeiras no Brasil (Fonte: DEPEC e BRADESCO, 2017).....	35
Figura 15: Ciclo da logística reversa com a destinação ambiental correta dos resíduos (Fonte: Adaptado de PNRS, 2010)	41
Figura 16: Obrigações da Lei: Política Nacional de Resíduos Sólidos (Fonte: BRASIL, 2010).	42

Figura 17: Ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos (Fonte: Adaptado de ABINEE, 2019).	44
Figura 18: fases de reciclagem dos refrigeradores na indústria FOX (Fonte: próprio autor). ...	46
Figura 19: Reciclagem dos refrigeradores indústria FOX (Fonte: Adaptado de INDUSTRIAFOX, 2010).	47
Figura 20: Reciclagem dos refrigeradores indústria FOX (Fonte: Adaptado de INDUSTRIAFOX, 2010).	48
Figura 21: Publicações referentes ao tema CAA com resíduo no período de 2015 a 2020 (Fonte: SCOPUS, 2019).	50
Figura 22: Principais autores que publicam na área do CAA com resíduo (Fonte: SCOPUS, 2019).	51
Figura 23: Principais países onde ocorrem trabalhos relacionados ao CAA com resíduo	51
Figura 24: Fluxograma do procedimento experimental para obtenção do CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	56
Figura 25: Pesagem da amostra (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	61
Figura 26: Sequência de obtenção do resíduo polimérico da indústria Fox até utilização no CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	61
Figura 27: Resíduo polimérico oriundo da reciclagem de refrigeradores separados segundo granulometria graúda e miúda (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2019).	62
Figura 28: Materiais separados para produção do CAA com 10% substituição de brita por resíduo polimérico em massa (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	65
Figura 29: Corpos de prova 10 x20 mm de CAA desmoldados submersos em processo de cura (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	66
Figura 30: Ensaio de massa específica em corpo de prova de concreto (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	69
Figura 31: Configuração básica do software Sonelastic para a caracterização dos corpos de prova e suporte para realização do ensaio (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	70
Figura 32: Ensaio de resistividade elétrica em corpo de prova de CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	72
Figura 33: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado para análise das amostra - marca Zeiss, modelo EVO MA15, Lab. de Física-Química UNIFEI/Itajubá (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	73
Figura 34: Curva granulométrica da areia (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	75
Figura 35: Curva granulométrica da brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	77

Figura 36: Resíduo polimérico de refrigeradores doados pela Indústria Fox ordenado segundo sua granulometria (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	78
Figura 37: Curva granulométrica do resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	79
Figura 38: Resíduo polimérico classificado em aspectos visuais (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	80
Figura 39: Levantamento em porcentagem para amostra de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	81
Figura 40: Obtenção de polioli poliéster (Fonte: VILAR, 2004).	83
Figura 41: comparação visual entre o resíduo polimérico e a brita, utilizados nesta pesquisa como agregado graúdo (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	83
Figura 42: Massa específica do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	84
Figura 43: Consumo de cimento do CAA com substituição de RP por brita.	85
Figura 44: Teor de ar do CAA com substituição de RP por brita	85
Figura 45: Diâmetro de espalhamento em função do percentual de substituição de resíduo polimérico de refrigeradores (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	86
Figura 46: Ensaio de espalhamento do traço CAA 0% (esquerda) e CAA 5% (direita)	87
Figura 47: Ensaio de espalhamento do traço CAA 10% (esquerda) e CAA 15% (direita).	87
Figura 48: Ensaio de espalhamento do traço CAA 20%.	88
Figura 49: Teor de substituição de RP por tempo de escoamento (T500) em CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	89
Figura 50: IEV para CAA 0% (esquerda) e CAA 5% (direita) (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	91
Figura 51: IEV para CAA 10% (esquerda) e CAA 15% (direita) (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	91
Figura 52: IEV para o CAA 20% (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	91
Figura 53: Tempo de escoamento no funil “v” do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	93
Figura 54: Ensaio de habilidade passante caixa L do CAA com substituição de RP por brita.	94
Figura 55: Ensaio de habilidade passante caixa L do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	95
Figura 56: Resistência à compressão longitudinal em função da substituição de resíduo no CAA em diferentes idades (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	100

Figura 57: Resistência à tração por compressão diametral (MPa) aos 28 dias de cura em função do percentual de substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	103
Figura 58: Massa específica do CAA com substituição de resíduo polimérico por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	104
Figura 59: Absorção de água no CAA em função da substituição de brita por resíduo polimérico.....	105
Figura 60: Índice de vazios no CAA com substituição de resíduo polimérico	105
Figura 61: Módulo de elasticidade dinâmico E_d (GPa) com substituição de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	107
Figura 62: Módulo elasticidade dinâmico (E_d) e módulo elasticidade estático (E_c) pelo método Popovics (2008) do CCA com substituição de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	109
Figura 63: Módulo de elasticidade estático pela NBR 6118:2014 e módulo de elasticidade estático pelo modelo de Popovisc (2008) do CAA com resíduo polimérico PRÓPRIO AUTOR, 2020.....	110
Figura 64: Resistividade elétrica do CAA em função da substituição de brita por resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).	112
Figura 65: Topografia por MEV ES da amostra do CAA 0% sem resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	114
Figura 66: Topografia por MEV ES da amostra CAA 5% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	115
Figura 67: Topografia por MEV ES da amostra CAA 10% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	115
Figura 68: Topografia por MEV ES da amostra CAA 15% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	116
Figura 69: Análise da topografia por MEV ES da amostra CAA 20% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das adições minerais de acordo com reatividade com a água.....	11
Tabela 2: Características e consequências do emprego de adições minerais nas propriedades do CAA	14
Tabela 3: Lista de ensaios alternativos para mensurar propriedades de trabalhabilidade do CAA	16
Tabela 4: Propriedades de trabalhabilidades do CAA e possíveis ensaios para mensura-las. ...	17
Tabela 5: Métodos de ensaio para CAA no estado fresco segundo a ABNT NBR 15823:2017	18
Tabela 6: Normalização nacional para o gerenciamento dos resíduos sólidos	38
Tabela 7: Etapas da reciclagem de refrigeradores	47
Tabela 8: Principais pesquisadores nacionais do tema CAA com resíduo	49
Tabela 9: Ensaios executados na caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa.	57
Tabela 10: Propriedades e características físicas do CPV - ARI.....	58
Tabela 11: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante SILICON AD 50404	59
Tabela 12: Características físicas e químicas da sílica ativa	59
Tabela 13: Etapas para produção do CAA sem e com resíduo polimérico.....	64
Tabela 14: Traços unitários em massa utilizados no CAA e consumo de cimento.	64
Tabela 15: Ordem de colocação dos agregados e o tempo gasto em cada etapa da produção de CAA	65
Tabela 16: Número de corpos de prova por ensaio no estado endurecido e suas respectivas normas	66
Tabela 17: Ensaios, normas e propriedade utilizadas no estado fresco do concreto	67
Tabela 18: Ensaios, normas e propriedades utilizadas no estado endurecido do concreto.	68
Tabela 19: Variação do valor de α_e com o tipo de agregado na fabricação dos concretos.....	72
Tabela 20: Características físicas e granulométricas da areia	75
Tabela 21: Características físicas e granulométricas da brita.....	76
Tabela 22: Características físicas e granulométricas do resíduo polimérico	78
Tabela 23: Levantamento quantitativo em massa para amostra de resíduo polimérico	80
Tabela 24: Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) e aspectos visuais de amostras de resíduo polimérico	81
Tabela 25: Comparação entre resíduo polimérico (RP) e brita	83

Tabela 26: Resultados do ensaio de massa específica, consumo de cimento e teor de ar do concreto.....	84
Tabela 27: Ensaio de espalhamento do CAA com substituição de RP por brita.....	86
Tabela 28: Ensaio de escoamento do CAA com substituição de RP por brita.....	88
Tabela 29: Ensaio de índice de estabilidade do CAA com substituição de RP por brita.....	90
Tabela 30: Ensaio de viscosidade plástica no funil “v” do CAA com substituição de RP por brita.....	92
Tabela 31: Ensaio de habilidade passante do CAA com substituição de RP por brita.....	94
Tabela 32: Comparação dos resultados obtidos no estado fresco do CAA com resíduo polimérico com os obtidos por outros autores de trabalhos similares a esta pesquisa.	97
Tabela 33: Resistência à compressão em (MPa) aos 7 dias de cura do CAA.	99
Tabela 34: Resistência à compressão em (MPa) aos 14 dias de cura do CAA.	99
Tabela 35: Resistência à compressão em (MPa) aos 28 dias de cura do CAA.	99
Tabela 36: Resistência à compressão em (MPa) aos 91 dias de cura do CAA.	100
Tabela 37: Resistência à tração por compressão diametral em (MPa) aos 28 dias de cura, para o CAA com resíduo polimérico.....	102
Tabela 38: Massa específica do CAA com resíduo polimérico.....	104
Tabela 39: Absorção e índice de vazios do CAA com resíduo polimérico.....	104
Tabela 40: Critérios para avaliação da qualidade do concreto.....	106
Tabela 41: Massa específica, Absorção e Índice de Vazios obtidos nesta pesquisa e na pesquisa de (Angelin, 2018).	106
Tabela 42: Valores do módulo de elasticidade dinâmico do CAA com substituição de resíduo polimérico por brita.....	107
Tabela 43: Ec a partir do Ed pelo método de Popovics (2008) do CCA com substituição de resíduo polimérico.....	109
Tabela 44: Módulo de elasticidade estático pela NBR 6118: 2014 do CAA com resíduo polimérico.....	110
Tabela 45: Dados utilizados da amostra para cálculo e valores de resistividade elétrica volumétrica do CAA com resíduo polimérico.....	111
Tabela 46: Probabilidade de corrosão em função da resistividade.....	112
Tabela 47: Determinação do teor de argamassa ideal para concreto convencional.....	132
Tabela 48: Limite de abatimento no Slump-test.....	133
Tabela 49: Traços rico, intermediário e pobre com abatimento e resistência alcançados.	134

Tabela 50: Adição do agregado fino e aditivo superplastificante para a determinação de traço referênci.....	135
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ARI = Alta resistência Inicial

IEV = Índice de estabilidade visual

R = Resistência elétrica (Ω/m)

A = Teor de ar

A = Área de seção transversal

a/c = Relação água cimento

ABNT = Associação brasileira de normas técnicas

ASTM = Society for Testing and Materials

C = Consumo de cimento

C₃A = aluminato tricálcio

CAA = Concreto autoadensável

CAA 0% = Concreto autoadensável com 0% de resíduo polimérico

CAA 5% = Concreto autoadensável com 5% de resíduo polimérico

CAA 10% = Concreto autoadensável com 10% de resíduo polimérico

CAA 15% = Concreto autoadensável com 15% de resíduo polimérico

CAA 20% = Concreto autoadensável com 20% de resíduo polimérico

CAD = Concreto de alto desempenho

CaOH = Hidróxido de cálcio

CAR = Concreto de alta resistência

CCV = Concreto convencional

CFC = Clorofluorcarbono

CH₂ = Metileno

cm = Centímetro

CNPq = Conselho Nacional de Pesquisa

CO = Monóxido de carbono

CO₂ = Dióxido de carbono

CONAMA = Conselho nacional do meio ambiente

CP = Corpo de prova

CPV = Cimento Portland V

CSH = silicato de cálcio hidratado

E = Módulo de elasticidade

E_c = Módulo de elasticidade estático

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico

EDS = Detector de elétrons secundários

EPS = Poliestireno expandido

EPS = Poliestireno expandido

ES = Elétron secundário

ETA = Estação de tratamento de água

EUA = Estados unidos da América

F_{ck} = Resistência à compressão do concreto

FTIR = Espectroscopia no Infravermelho

IEV = Índice de estabilidade visual

ISO = International organization for standardization

Kg/dm^3 = Quilograma por decímetro cúbico

kg/m^3 = Quilograma por metro cúbico

L = comprimento

m^2/kg = Metro quadrado por quilograma

MD = Módulo de finura

ME = Massa específica

MEV = Microscópio eletrônico de varredura

MF_{br} = brita Módulo de finura da brita

MF_{RP} = Módulo de finura do resíduo polimérico

min = Minuto

mm = Milímetro

MPa = Mega Pascal

MU = Massa unitária

NBR = Norma brasileira

NDI = nafitileno di-isocianato

NH₃ = Amoníaco ou amônia

O = Oxigênio

PET = polietileno tereftalato

PET = Politereftalato de etileno

ph = Potencial de hidrogênio

PIB = Produto interno bruto

PNRS = Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPDI = parafenilenediisocianato

PPG = polipropileno glicol

PTMEG = politetrametileno glicol

PU = Poliuretano

PVA = poliacetato de vinila

PVC = Policloreto de vinila

R' = Radical livre

REEE = Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

RP = Resíduo polimérico

SA = Sílica ativa

SBR = Borracha de butadieno estireno

SBR = Borracha de Estireno Butadieno

SF = Slump flow test

SiO₂ = Dióxido de sílica

SPA = Super Plastificante

TEI = Técnica de excitação por impulso

TEM = Microscópio eletrônico de transmissão

TPU = Elastômero termoplástico

UNIFEI = Universidade Federal de Itajubá

VMA = aditivos modificadores de viscosidade

ZTI = Zona de transição na interface

α = Constante adimensional tipo de agregado

μm = Micrômetro

ρ = Resistividade elétrica específica do material

ρ_f = Massa específica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Concreto autoadensável (CAA) - Definição.....	5
2.1.1. Composição e materiais do CAA	6
2.1.2. CAA no estado fresco: avaliação da trabalhabilidade	16
2.1.3. CAA no estado endurecido	19
2.1.4. Vantagens do CAA	20
2.1.5. Aplicação e concretagem do CAA	22
2.1.6. Métodos de dosagem do CAA.....	24
2.1.7. Microestrutura do CAA	25
2.1.8. Módulo de elasticidade do CAA	27
2.1.9. Resistividade elétrica do CAA	31
2.2. Resíduo oriundo do Setor eletroeletrônico	33
2.2.1. Mercado dos refrigeradores no Brasil.....	34
2.2.2. Classificação e gestão dos resíduos sólidos	36
2.2.3. Gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE).....	39
2.2.4. Logística reversa e gestão dos resíduos sólidos	40
2.2.5. Ciclo de vida dos refrigeradores.....	43
2.2.6. Fases da reciclagem dos refrigeradores na indústria Fox	45
2.3. Estado da arte.....	48
2.3.1. Pesquisa nacional do CAA com resíduo	48
2.3.2. Pesquisa internacional do CAA com resíduo	49

2.4. Revisão da literatura.....	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1. Materiais	56
3.1.1. Resíduo polimérico (RP) de refrigerador.....	60
3.2. Método de dosagem e produção dos traços.....	62
3.3. Ensaio do CAA estado fresco e endurecido	67
3.3.1. Ensaio no estado fresco	67
3.3.2. Ensaio no estado endurecido.....	67
3.3.3. Ensaio de resistência à compressão axial.....	68
3.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	68
3.3.5. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	69
3.3.6. Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)	69
3.3.7. Resistividade elétrica do concreto	72
3.3.8. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1. Resultado da caracterização dos agregados.....	74
4.1.1. Agregado miúdo	74
4.1.2. Agregado graúdo	76
4.1.3. Resíduo polimérico (RP) de refrigerador.....	77
4.2. Propriedades no estado fresco	84
4.2.1. Massa específica, consumo de cimento e teor de ar do concreto no estado fresco ..	84
4.2.2. Ensaio de espalhamento (Slump flow test).....	86
4.2.3. Tempo de escoamento (Slump flow test T500).....	88
4.2.4. Índice de estabilidade visual (IEV).....	90
4.2.5. Viscosidade plástica aparente (funil V)	92
4.2.6. Habilidade passante (Caixa L)	93
4.3. Propriedades no estado endurecido.....	98

4.3.1. Ensaio de resistência à compressão longitudinal.....	99
4.3.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	102
4.3.3. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	103
4.3.4. Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)	107
4.3.5. Estimativas do módulo de elasticidade estático (E_c).....	108
4.3.6. Resistividade elétrica do concreto	111
4.3.7. Análise microestrutural.....	113
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
6. CONCLUSÕES	120
6.1. Sugestão para trabalhos futuros.....	121
7. Bibliografia	122
APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DE CAA	132

1. INTRODUÇÃO

Concreto é o material de construção civil mais largamente utilizado em todo mundo. Como um resultado progressivo na tecnologia, construções sustentáveis tem se tornado uma parte indispensável da civilização (GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015). O concreto de forma geral é um material que o comportamento depende de suas fases constituintes, tais como: agregado, pasta de cimento, e interface pasta agregado.

Com a crescente demanda de estruturas mais resistentes e duráveis, o desenvolvimento do concreto como tecnologia se fez necessário. Assim surge o concreto autoadensável (CAA) que foi desenvolvido no final dos anos oitenta, no Japão, objetivando aumentar a durabilidade de estruturas e pode ser considerado um desenvolvimento do tipo tradicional do concreto convencional (OKAMURA e OUCHI, 2003). Um dos principais motivos de sua utilização era a obtenção de um material que não necessitasse de compactação ou vibração para adensar e preencher as formas, tendo seu adensamento garantido exclusivamente pelo seu peso próprio (OKAMURA e OUCHI, 2003). Há uma grande quantidade de trabalho tem sido reproduzida e há importantes trabalhos que visão a aplicação do CAA e sua utilização em larga escala (BOGAS, GOMES e PEREIRA, 2012).

O CAA possui alta fluidez e coesão, o que permite um espalhamento e compactação, a partir do seu próprio peso, sem nenhum trabalho de vibração (OKAMURA e OUCHI, 2003). O CAA pode facilmente preencher pequenos interstícios, bem como assumir formas complexas; além de ser possível seu bombeamento para longas distâncias (GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015). Limitando a quantidade e a dimensão máxima do agregado graúdo, usando aditivos químicos, tais como, aditivos modificadores de viscosidade (VMA) e aditivos redutores de água de alto desempenho (superplastificantes), incorporando adições minerais, e usando baixa relação água cimento são práticas comuns para se chegar na alta compactabilidade requerida para o CAA (GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015).

Na maioria das situações, o CAA convencional é produzido usando alto consumo de cimento. Por esse motivo, alguns problemas patológicos tais como, alto calor de hidratação, grande retração e elevado custo podem ser introduzidos na sua execução. Isso pode contribuir em aumentar os impactos ambientais devido ao consumo exagerado de recursos naturais,

associados principalmente com a emissão de óxidos de carbono (monóxido e dióxido de carbono) devido à produção de cimento (JALAL, MANSOURI, *et al.*, 2012; GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015).

Uma forma de tornar o concreto menos agressivo ao meio ambiente é utilizando adições minerais, tais como: sílica ativa, cinza volante, argila expandida, materiais reciclados de origem polimérica (borrada de pneu, PVC, PVA, SBR entre outros). A adição de agregados similares a estes, pode ser uma forma de diminuir o custo da produção e impacto ambiental do CAA, devido à diminuição do conteúdo de cimento e agregados naturais (GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015; ANGELIN, LINTZ e GACHET, 2018; MOHAMMEDA, 2019).

Na literatura, é reportado que a utilização de adições minerais e/ou agregados reciclados não convencionais, aumenta a propriedade de alta compactação do CAA, bem como propriedades mecânicas e de durabilidade (ZHU e BARTOS, 2003; GESOGLU e OZBAY, 2007; GUNNEYISI, 2010; R. MADANDOUST, 2012 GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015; SADRMOHTAZI, 2016; ASLANI, 2018). Dal Molin (2009) investiga a influência do SA no processo de corrosão de concretos armados. Angelin (2018) investiga a adição de borracha de pneu e agregados leves, como argila expandida nas propriedades frescas e endurecidas do CAA. Ruizhe Si (2018) investiga o desempenho de CAA fresco e endurecido com adição de borracha com e sem tratamento superficial de hidróxido de sódio como resultados encontrar que o CAA manteve boa trabalhabilidade e propriedades mecânicas além de melhora na durabilidade. Jose Sainz-Aja (2019) investiga a incorporação de resíduos de lastros e dormentes de pavimentos antigos como agregado no CAA. Seus resultados mostram que esse tipo de agregado pode ser usado como agregado na execução de CAA, principalmente na construção de pavimentação.

A produção de concretos sustentáveis que vise diminuir a geração de resíduos da construção civil, e utilizando com isso outros resíduos que sejam próprios da construção civil ou não, também é tendência no campo de pesquisa e que trás muitos benefícios para sociedade como um todo (SIDDIQUE, 2008). Inserido neste contexto, um resíduo que é pouco explorado quanto à reciclagem e que é gerado em grandes quantidades em todos os centros urbanos é o lixo eletroeletrônico que é objeto desta pesquisa e que será incorporado nos traços de concretos autoadensáveis desenvolvidos.

A categoria de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é a que mais cresce ao redor do mundo (AWASTHI A.K., 2018). E em números, segundo pesquisa de Baldé (2017), sua geração é superior a 45 milhões de toneladas por ano. É possível se fazer uma classificação em sete categoriais de equipamentos eletroeletrônicos tendo como base a Diretiva Europeia e especificações de práticas que são: eletrodomésticos, eletroeletrônicos, monitores, informática e telecomunicações, fios e cabos, pilhas e baterias, e lâmpadas (DIRETIVAEUROPEIA, 2018).

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido por meio de revisão da literatura e parte prática/experimental. Os principais meio de embasamento teórico foram: teses, dissertações, artigos e sites especializados no assunto. Grande parte desta pesquisa foi desenvolvida por meio de experimentos práticos no laboratório, como: caracterização dos materiais, desenvolvimento de traços e ensaios mecânicos, físicos e revelação da microestrutura. As análises dos dados foram feitas através de análise quantitativa, os dados numéricos coletados foram ordenados e comparados. Como produto final, espera se produzir CAA com resíduo de eletrodomésticos de refrigeradores (REEE) como uma alternativa para um descarte ambientalmente adequado.

1.1. Justificativa

Estudos que aliam o desenvolvimento do concreto como tecnologia e ao mesmo tempo contenham soluções ambientais, para descarte de resíduos sólidos são muito relevantes para desenvolver ecologicamente a infra e superestrutura das cidades. Visto que, o concreto é material mais utilizado no mundo, sendo fundamental na maioria das construções. A originalidade deste trabalho se baseia no fato de que este tipo de resíduo é pouco explorado quanto à reciclagem e fonte de matéria prima para produção de novos materiais. Com isso, esta pesquisa visa avaliar concreto autoadensável modificado pela substituição de brita por resíduo polimérico, proveniente da reciclagem de refrigeradores.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a obtenção de concreto autoadensável (CAA) com resíduo polimérico de refrigeradores substituindo em proporções a brita, e caracterizar suas principais propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foi necessário:

- Fazer uma revisão crítica do estado atual das pesquisas de CAA com substituição de resíduos por agregado.
- Elaborar traços de CAA que permitam a substituição de resíduos reciclados de refrigeradores;
- Realizar ensaios que permitam a caracterização das propriedades mecânica, físicas e revelação da microestrutura dos concretos produzidos;
- Comparar os resultados obtidos com normas e trabalhos científicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto autoadensável (CAA) - Definição

O Concreto Autoadensável (CAA) foi desenvolvido no Japão na década de 80 por Okamura devido à necessidade de se produzir um concreto mais durável, de alta resistência e boa trabalhabilidade para aplicação em estruturas com alta densidade de armaduras e de difícil acesso (OKAMURA e OUCHI, 2003). O CAA é um concreto inovador que não requer vibração para compactação. É capaz de fluir sob seu próprio peso, preenchendo completamente a forma de concretagem e alcançando compactação total, mesmo na presença de reforço congestionado. O concreto endurecido é denso, homogêneo e possui geralmente as mesmas propriedades de engenharia e durabilidade do concreto vibrado tradicional (EFNARC, 2005).

Um tipo de concreto que requer pouca vibração ou compactação já é usado na Europa desde o início dos anos 1970, mas o concreto autoadensável foi desenvolvido somente no final dos anos 80 no Japão. Na Europa, provavelmente foi usado pela primeira vez em obras civis para redes de transporte na Suécia em meados da década de 1990. Entre os anos de 1997 a 2000 a Comunidade Europeia financiou um projeto multinacional, entre os líderes da indústria da construção civil e, desde então, o CAA encontrou um uso crescente em todos os países europeus (EFNARC, 2005).

Segundo a EFNARC (2002) o CAA possui características distintas que são:

- Habilidade de preenchimento (Filling ability): ser capaz de preencher completamente a forma de trabalho sem nenhuma intervenção mecânica;
- Habilidade passante (Passing ability): manter estabilidade ou homogeneidade entre seus materiais constituintes, mesmo em locais densamente armados e fazendo uso somente do seu próprio peso.
- Resistência à segregação (Segregation resistance): capacidade de manter o agregado graúdo em suspensão e a água de amassamento em equilíbrio no interior da mistura.

A principal atratividade do seu uso é a facilidade de manuseio e aplicação. A habilidade de preenchimento das fôrmas se dá exclusivamente por meio da ação da gravidade, sem nenhuma interferência mecânica ou manual. Ao se trabalhar com concretos mais fluidos,

tem-se como consequência redução no tempo de manuseio e adensamento, ocasionando maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem (KARAHAN, 2013; YUNG, 2013).

Para manter as características do concreto autoadensável é necessário usar de superplastificantes, adições minerais, materiais finos e alto teor de argamassa. Isso resulta em uma maior coesão e fluidez da pasta, porém, em contrapartida tem-se um concreto que absorve menos energia, ou seja, um material mais rígido (KWASNY, 2012; RAHMAN, 2012).

O concreto autoadensável é projetado para ter alta fluidez combinado com características de coesão que garantem que o agregado seja uniformemente suspenso e não segregado. O uso de vibradores afetará esse equilíbrio e geralmente levará a uma segregação significativa (EFNARC, 2002).

2.1.1. Composição e materiais do CAA

Os materiais constituintes do CAA são os mesmos usados no concreto convencional: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, e água. Contudo é usual que se use no CAA uma maior quantidade de materiais de granulometria finas (agregado miúdo e materiais em forma de pó) para se alcançar as características no estado fresco requeridas para o CAA. O CAA demanda o uso de adições com características especiais como aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade. (GOMES; BARROS, 2009; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015, XAVIER, 2018). Para se assegurar da correta uniformidade e consistência do CAA, adicional cuidado é necessário e as etapas de execução do traço devem ser monitoradas. Deve haver um controle de modo a aumentar a tolerância de restrição para variações das características dos materiais empregados (EFNARC, 2005).

O CAA se diferencia do concreto convencional somente por características reológicas no estado fresco. Além disso, todos os materiais utilizados na confecção do concreto convencional podem ser utilizados no CAA, no entanto existem algumas recomendações especiais. Tais como: maior adição de finos e uso de aditivos superplastificante e em algumas ocasiões aditivos modificadores de viscosidade (MVA) (BORJA, 2011).

Há necessidade de maior teor de finos passantes na peneira 200 mesh (75 μ m) e controle quanto ao uso de agregados graúdos de granulometria acima de 19 mm e um maior

teor de argamassa (SANTOS e SILVA, 2009). Os aditivos superplastificantes de 3º geração à base de éteres policarboxílicos proporcionam alta fluidez e baixa relação água/cimento na produção de concretos e são recomendados seu uso em CAA (SOUZA, 2003). As adições minerais e/ou aditivos modificadores de viscosidade quando adicionados para a produção do CAA promovem melhor fluidez (habilidade passante) e auxiliam na coesão da mistura (resistência à segregação) (BORJA, 2011).

Citado por Okamura e Ouchi (2003) a Figura 1, exibe de forma simplificada a diferenciação entre a composição volumétrica do CAA e o concreto convencional.

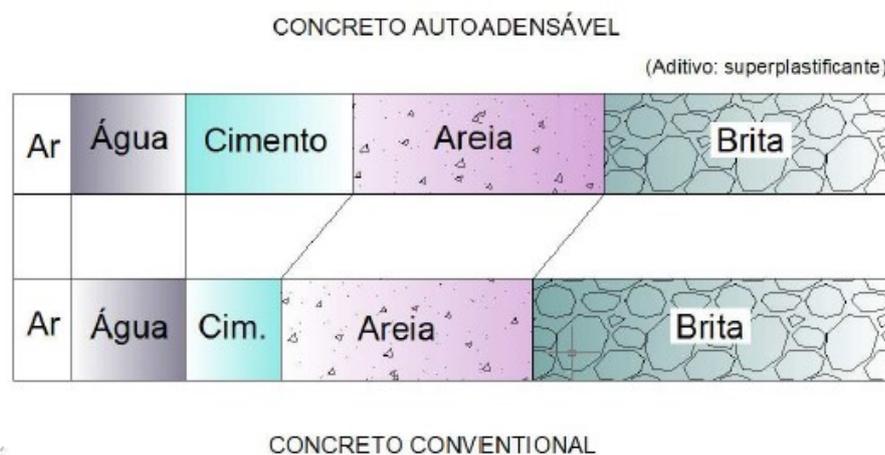


Figura 1: Comparação da composição da mistura entre CAA e concreto convencional (Fonte: (OKAMURA e OUCHI, 2003).

A seguir são levantados alguns pontos importantes a cerca da dosagem de CAA de forma resumida (REPETTE, 2008).

- a) Uso de aditivo superplastificante à base de ácido policarboxílico (3ª geração);
- b) Consumo de materiais finos ou teor de finos (diâmetro $\leq 75 \mu\text{m}$) entre 400 kg/m^3 a 600 kg/m^3 ;
- c) Entre 0,80 e 1,10 a relação de água/finos totais;
- d) Na ausência de finos ou em adição a esses, o uso de aditivo promotor (ou modificador) de viscosidade é interessante. Sendo que seu uso em CAA não é obrigatório;
- e) O uso de agregados graúdos com dimensões de até 10 mm de diâmetro pode ocasionar em concretos mais baratos e qualidades superiores aos que não fizeram uso do agregado graúdo;

- f) De forma geral, a faixa de utilização para o agregado miúdo está compreendida em volume entre 35% e 50%, e o agregado graúdo entre 25% a 35% em volume.

A água de amassamento para produção do CAA não tem necessariamente requisitos específicos. Sendo sua utilização igual a do concreto convencional. Contudo, uma característica do CAA é a baixa relação água/cimento que consiste em substituição de parte da água por superplastificante. Visando com isso atingir parâmetros estabelecidos de trabalhabilidade e coesão no estado fresco; resistência e durabilidade no estado endurecido (BORJA, 2011).

2.1.1.1. Cimento no CAA

Todos os tipos de cimento podem ser utilizados para a produção de CAA, alguns tipos específicos de cimentos irão variar devido a necessidades especiais requeridas para um determinado concreto, tais como resistência a compressão longitudinal e durabilidade (EFNARC, 2005). No momento da escolha do concreto é importante levar em considerações duas características do cimento que são a granulometria e a quantidade de aluminato tricálcio (C_3A). O uso de cimentos com superfícies específicas elevadas é preferível, pois, contribui para uma melhor hidratação dos grãos de cimento. Que por serem menores, entram em contato com a água mais facilmente. Isso por sua vez, contribui para reduzir a tensão superficial de escoamento e tem como resultado diminuição da viscosidade. Com relação ao conteúdo de C_3A é recomendado uso de cimentos com até 10% de C_3A . Pois, altos teores de C_3A resultam maior dificuldade do controle da trabalhabilidade, e pode ocorrer retardamento no processo de cura do concreto (GJORV, 1992 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; XAVIER, 2018).

É frequente a utilização de consumo de cimento variando de 350 a 450 kg/m³. Consumos de cimento acima de 500 kg/m³ podem causar grandes retrações. Já consumos de cimento menores que 350 kg/m³ podem apenas serem adequados com a inclusão de outros materiais finos cimentantes, tal como cinza volante e pozonala (FONTE:EFNARC, 2005).

2.1.1.2. Agregados no CAA

Os agregados apresentam características e propriedades de grande importância na produção do concreto, sendo as principais: porosidade, granulometria, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade, presença de

substâncias deletérias, dentre outras. Tais características estão relacionadas com propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido, tais como: trabalhabilidade, coesão, resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Devem ser tomados cuidados adicionais no monitoramento da umidade, absorção de água, classificação e às variações na quantidade de finos (GOMES e BARROS, 2009).

Nota: agregados com partículas menores que 0,125 mm são considerados como parte do material fino ou teor de pó 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 monitorados de perto e continuamente devem ser levados em consideração para produzir um CAA de qualidade constante. A distribuição da forma e do tamanho das partículas do agregado é muito importante e afeta o conteúdo da embalagem e dos vazios (EFNARC, 2005).

De forma geral, os agregados para produção de CAA devem atender aos mesmos requisitos que os agregados utilizados em concretos convencionais. Segundo Mehta e Monteiro (2014), por muito tempo os agregados foram tratados apenas como material de enchimento para o concreto, por serem componentes baratos em relação aos outras matérias utilizados no concreto e também por não produzirem reações químicas complexas quanto em contato com água. Entretanto, os agregados vêm sendo estudados, e sua visão de material inerte tem sido contrariada (EFNARC, 2005).

Agregados leves têm sido usados com sucesso, mas é importante se tomar cuidado com a migração do mesmo para a superfície se a viscosidade da pasta for baixa e isso não for detectado pelo teste de resistência à segregação da peneira (EFNARC, 2005).

O espaçamento do reforço é o principal fator na determinação do tamanho máximo agregado. O agregado que bloqueie o fluxo de concretagem deve ser evitado, pois o CAA deve fluir através da armação de reforço e o teste caixa L é indicativo da capacidade de verificação de uma mistura de CAA. O tamanho máximo do agregado geralmente deve ser limitado de 12 mm a 20 mm, embora tamanhos maiores estejam sendo usados (EFNARC, 2005).

Areia ou agregado fino: A influência de agregados finos nas propriedades frescas do CAA é significativamente maior que a do agregado graúdo. As frações de partículas com diâmetros inferiores a 0,125 mm devem ser incluídas como o teor de finos da pasta e

também devem ser levadas em consideração no cálculo da relação água e cimento (EFNARC, 2005).

O alto volume de pasta ou argamassa nas misturas de CAA ajuda a reduzir o atrito interno entre as partículas de areia, mas uma boa distribuição de tamanho de grão ainda é muito importante. Muitos métodos de mistura de CAA usam areias combinadas para corresponder a uma curva de classificação agregado otimizada e isso também pode ajudar a reduzir o conteúdo da pasta (EFNARC, 2005).

Os agregados miúdos podem ser utilizadas tanto as areias naturais, quanto as areias oriundas de processos industriais, sendo que as naturais são mais indicadas pois possuem textura mais lisa e forma mais arredondada, o que acarreta um aumento de fluidez na mistura e partículas de agregados miúdos mais angulosas possibilitam uma maior resistência ao cisalhamento das argamassas (OKAMURA; OUCHI, 2003; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). A Figura 2 mostra a influência da forma da areia sobre a tensão de cisalhamento do concreto.

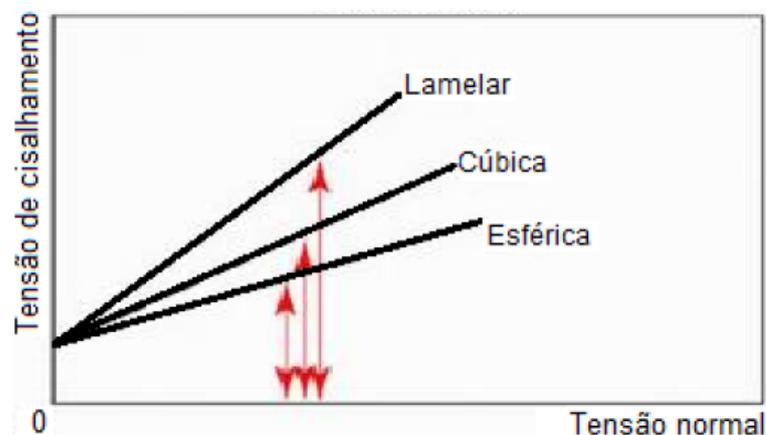


Figura 2: Influência de três tipos de areia sobre a tensão de cisalhamento da mistura de CAA quando em movimento (Fonte: Okamura e Ouchi, 2003)

Também deve ser levado em consideração o módulo de finura do agregado miúdo, pois quanto mais fino (maior a área superficial) mais propício ele será para o desenvolvimento da coesão. Entretanto, segundo a EFNARC (2005), as partículas de agregados passantes da peneira 0,125 mm devem ser classificadas como filer na dosagem dos CAA.

Se tratando do volume de agregados do CAA, Gomes e Barros (2009), indicam um volume de agregado graúdo que varie entre 28 % e 35 %, em relação ao volume do concreto,

com consumos entre 750 e 920 kg/m³. E para os agregados miúdos é recomendado um volume entre 40% e 50% do volume de concreto, com consumos aproximados de 710 a 900 kg/m³.

2.1.1.3. Adições minerais no CAA

As adições minerais podem fazer parte da composição do CAA trabalhando como material fino (EFNARC, 2002). Elas auxiliam no aumento da porcentagem de argamassa como é ilustrado na Figura 1, em que as porções indicadas como cimento e areia representam os agregados que formam a argamassa.

As adições são materiais de origem mineral e tem sua composição a partir de minerais sílicos ou sílico-aluminosos, frequentemente em forma de pó. As adições com características cimentantes ou pozolânica são adicionadas nos concretos em quantidades variáveis em relação à massa do cimento, entre 10% e 100%. A fim de melhorar algumas características da argamassa e trabalhar em conjunto com o cimento, no processo de aglutinação dos agregados (BORJA, 2011).

Devido aos requisitos específicos para as propriedades no estado fresco do CAA, adições do tipo inertes, pozolânicas e cimentantes são comumente usadas para promover e manter a coesão e resistência à segregação. As adições também iram diminuir a quantidade de cimento e com isso reduzir o calor de hidratação e contração térmica.

As adições são classificadas de acordo com sua reatividade com a água como é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das adições minerais de acordo com reatividade com a água

Tipo I	Inerte ou semi-inerte	Mineral filler (calcário, dolomita) Pigmentos
Tipo II	Pozolânico	Cinza Volante Sílica ativa
	Hidráulica	Escória granulada de alto forno.

Fonte: Adaptado de EFNARC, 2005.

Fillers minerais: A distribuição dos tamanhos das partículas, forma e absorção de água dos fillers minerais podem afetar a demanda de água usada na fabricação do CAA. A faixa de granulometria mais vantajosa é que menor que 0,125 mm e, em geral, é desejável que mais de 70% passem por uma peneira de 0,063 mm.

Cinza volante: As cinzas volantes tem se mostrado uma efetiva adição para o CAA promovendo aumento da coesão e reduzindo a sensibilidade para mudanças na quantidade de água. Contudo, altos níveis de cinza volante podem produzir uma fração de pasta que é tão coesiva que pode ser resistente para fluir.

Sílica ativa: A sílica ativa possui alto nível de finura e forma praticamente esférica e seu uso resulta em boa coesão e melhora a resistência a segregação.

Escória do alto-forno: A escória granulada do alto-forno moída fornece finos reativos com um baixo calor de hidratação. Ela já está presente em alguns cimentos, exemplo: Cimento Portland II-E-32. Mas também está disponível como adição em alguns países e pode ser adicionado no momento da execução do traço.

As adições mineiras também podem ser classificadas de acordo com sua ação físico-química, em três classes ou grupos distintos: material pozolânico, material cimentante e filler (DAL MOLIN, 2005).

Material pozolânico: material sílicos ou sílico-aluminoso são materiais que sozinhos possuem pouco ou nenhuma propriedade cimentícia ABNT NBR 12653:2015. Mas quando em granulometria adequada e em contato com água reagem com hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes ABNT NBR 12653:2015. E esta reação química é denominada de reação pozolânica. Como exemplo, pode-se citar a cinza volante com baixo teor de cálcio, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e o metacaulim (DAL MOLIN, 2005).

Material cimentante: são materiais que devidamente hidratados por si só são capazes de formar produtos cimentantes, pois já possuem em sua composição o hidróxido de cálcio (CaOH) ABNT NBR 12653:2015. Com isso, esse tipo de material não depende do hidróxido de cálcio (CaOH) que está presente no cimento Portland para formar o silicato de cálcio hidratado CSH (subproduto das reações de hidratação do cimento que fornece resistência mecânica). No entanto, de modo geral, os materiais cimentantes possuem uma auto hidratação muito lenta. Com isso a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente, e isso dificulta sua aplicação para fins estruturais, como é o caso da escória granulada de alto forno (DAL MOLIN, 2005).

Filler: adição mineral sem atividade química, sua ação na mistura do concreto se resume em um efeito de empacotamento granulométrico, já que possui granulometria fina. Também desempenha ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

Quando introduzidas no concreto no estado fresco as adições minerais do tipo pozolânica reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio e geram como produto, uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (CSH) que desempenha papel importante no ganho de resistência do concreto no estado endurecido. (BORJA, 2011).

Para melhor representar o efeito que as adições minerais exercem na pasta de cimento, a Figura 3 trás três situações. A primeira contendo somente cimento portland e água, já na segunda há a introdução do superplastificante e na terceira de adição mineral (CORDEIRO, 2006).

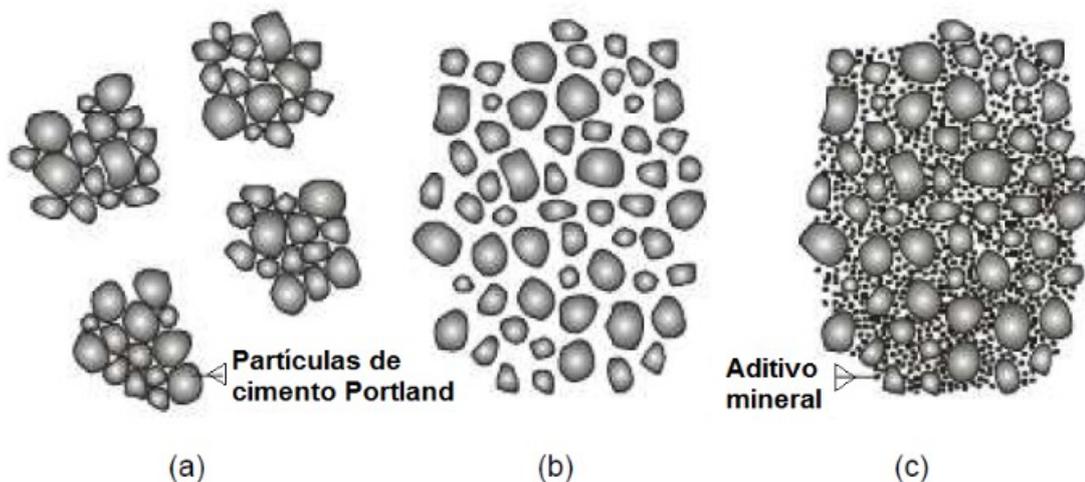


Figura 3: Representação esquemática de: partículas de cimento Portland em pastas sem aditivos (a); com aditivos superplastificantes (b) e, com superplastificante e aditivo mineral de elevada finura (c) (Fonte: adaptado de CORDEIRO, 2006).

No CAA, as adições minerais exercem função de dar estabilidade ou coesão. Elas preenchem os vazios, com isso é possível maior estabilidade a todo sistema. Além do mais, sendo essa adição do tipo cimentante ou pozolânica, podem contribuir para a formação de compostos resistentes no material endurecido (BORJA, 2011).

Na Tabela 2 é apresentado um resumo das principais características das adições minerais e suas consequências, tanto no estado fresco e endurecido, como em substituição ao cimento no concreto autoadensável (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2006).

Tabela 2: Características e consequências do emprego de adições minerais nas propriedades do CAA

Adição mineral	Cinza Volante	Escória de alto-forno	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza de casca de arroz
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoeletricas, como objetivo de gerar energia	Subproduto não-metálico resultante do processo de obtenção do ferro gusa	Subproduto resultante de processo de obtenção do ferro-silício e do sílico metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através do tratamento do resíduo da indústria de papel	Calcinação da casca de arroz
Forma e textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera
Massa específica (kg/m³)	2350	-	2200	2400	2200 a 2600
Superfície específica (m²/kg)	300 a 700	300 a 700	13000 a 30000	Variável em função da moagem	50000 a 100000
Tamanho médio das partículas	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem	0,1 a 0,2 µm	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem
Efeito no CAA fresco quando utilizado como substituição ao cimento	Aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas, normalmente reduz o consumo de superplastificante	Aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas, pouco altera o consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas, aumento do consumo de superplastificante, teores acima de 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, não contribui para fluidez em função da forma e textura das partículas, aumento do consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas, elevado aumento no consumo de superplastificantes
Efeito no CAA endurecido quando utilizado como substituição ao cimento	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhora notável da resistência à compressão e da durabilidade	Melhora notável da resistência à compressão e da durabilidade	Melhora notável da resistência à compressão e da durabilidade

Fonte: BORJA, 2011.

2.1.1.4. Aditivos no CAA

Superplastificantes ou aditivos redutores de água são componentes essenciais do CAA. Os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) também podem ser usados para ajudar a reduzir a segregação e a sensibilidade da mistura devido a variações em outros constituintes,

especialmente no teor de água. Outros aditivos, incluindo incorporadores de ar, aceleradores e retardadores do tempo de pega, podem ser usados da mesma maneira que no concreto vibrado tradicional, mas deve-se tomar o cuidado e procurar o fabricante do produto para verificar o tempo e quantidade ideal para adição (EFNARC, 2005).

A escolha da mistura para desempenho ideal pode ser influenciada pelas propriedades físicas e químicas do tipo de adição. Por exemplo: fatores como finura, teor de carbono, álcalis e C_3A podem ter efeito (EFNARC, 2005).

Superplastificante ou Aditivos redutores de água: A mistura deve proporcionar a necessária redução de água e adequada fluidez, mas também deve manter seu efeito dispersante durante o tempo necessário para o transporte e a aplicação. A retenção de consistência necessária dependerá do tipo de aplicação. É provável que o concreto pré-fabricado exija um tempo de retenção menor do que o concreto trabalhado no local da obra (in-loco) (EFNARC, 2005).

Aditivos modificadores de viscosidade (VMA): Os aditivos que modificam a coesão do CAA sem alterar significativamente sua fluidez são chamadas de VMA. Esses aditivos são usados no CAA para minimizar o efeito de variações no teor de água, finos e agregados miúdos ou na distribuição do tamanho dos grãos, tornando o CAA menos sensível a pequenas variações nas proporções. No entanto, eles não devem ser considerados como uma maneira de evitar a necessidade de um bom traço de mistura e seleção cuidadosa de outros componentes do CAA (EFNARC, 2005).

Aditivos incorporadores de ar: Estes podem ser usados na produção de CAA para melhorar a durabilidade do congelamento e degelo. Eles também são usados para melhorar o acabamento de lajes planas e a incorporação de ar é particularmente útil na estabilização de baixo teor de pó e menor resistência do CAA (EFNARC, 2005).

Fibras: Com relação ao uso de fibras, pode se dizer que as fibras metálicas e poliméricas têm sido usadas na produção de CAA, mas de modo geral, podem reduzir a fluidez e a capacidade de passagem. Portanto, são necessários ensaios 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 fissuração e rachaduras devido ao encolhimento plástico do concreto (EFNARC, 2005).

As fibras estruturais de aço ou polímero longo são usadas para modificar a ductilidade e tenacidade do concreto temperado. Seu comprimento e quantidade são selecionados dependendo do tamanho máximo do agregado e dos requisitos estruturais. Se forem utilizados como substitutos do reforço normal, o risco de bloqueio não é mais aplicável, mas deve-se enfatizar que o uso de CAA com fibras em estruturas com reforço normal aumenta significativamente o risco de bloqueio. Entende-se bloqueio como o impedimento do fluxo de concreto (EFNARC, 2005).

Água de mistura: É recomendado o uso de água potável proveniente de fonte de tratamento devidamente regulamentado. A água reciclada, recuperada de processos na indústria do concreto, pode ser utilizada. O tipo e conteúdo e, em particular, qualquer variação no conteúdo de partículas em suspensão deve ser levada em consideração, pois isso pode afetar a uniformidade da mistura (EFNARC, 2005).

2.1.2. CAA no estado fresco: avaliação da trabalhabilidade

O CAA por ser uma inovação, foi desenvolvido todo um conjunto de equipamentos para se medir suas características quanto suas propriedades no estado fresco. Para cada propriedade que deseja se mensurar são recomendados grupos de aparelhos que dentro de suas limitações podem dar um bom parâmetro quanto à trabalhabilidade (TUTIKIAN, 2004).

Muitos métodos de ensaio diferentes foram desenvolvidos na tentativa de caracterizar as propriedades do CAA. Até o momento, nenhum método ou combinação de métodos alcançou aprovação universal. Desta forma, de modo a testar as principais propriedades do CAA, vários métodos de teste alternativos para os diferentes parâmetros devem ser testado em conjunto. A Tabela 3 mostra uma lista de ensaios recomendados para se medir a trabalhabilidade do CAA no estado fresco (EFNARC, 2002).

Tabela 3: Lista de ensaios alternativos para mensurar propriedades de trabalhabilidade do CAA

Ensaio	Propriedades
Espalhamento – <i>Slump-flow por Abrams cone</i>	Habilidade de preenchimento (<i>Filling ability</i>)
Viscosidade plástica aparente – <i>T500 Slump flow</i>	Habilidade de preenchimento (<i>Filling ability</i>)
Habilidade passante pelo anel J <i>J-ring</i>	Habilidade passante (<i>Passing ability</i>)
Viscosidade plástica aparente pelo funil V – <i>V-funnel</i>	Habilidade de preenchimento (<i>Filling ability</i>)
<i>V-funnel at T 5 minutos</i>	Resistência à segregação (<i>Segregation resistance</i>)
Habilidade passante pela caixa L - <i>L-Box</i>	Habilidade passante (<i>Passing ability</i>)

Habilidade passante pela caixa U - <i>U-Box</i>	Habilidade passante (<i>Passing ability</i>)
Habilidade de enchimento de caixa – <i>Fill-box</i>	Habilidade passante (<i>Passing ability</i>)
<i>GTM screen stability test</i>	Resistência à segregação (<i>Segregation resistance</i>)
<i>Orimet</i>	Habilidade de preenchimento (<i>Filling ability</i>)

Fonte: Adaptado de EFNARC, 2002.

Os principais ensaios utilizados em trabalhos acadêmicos são: *Slump Flow*, *Slump Flow T50*, *V-Funnel* e *Lbox*. Pois, em conjunto dão uma boa noção das principais características do CAA no estado fresco: fluidez, habilidade passante, e resistência à segregação (TUTIKIAN, 2004).

Para garantir a adequada trabalhabilidade do CAA é preciso que todos os três parâmetros de trabalhabilidade sejam avaliados por um ou por mais de um ensaio. Na Tabela 4 é mostrado a relação de propriedade de trabalhabilidade e os possíveis ensaios que as medem, bem como o local apropriado para ser realizado o ensaio (EFNARC, 2002).

Tabela 4: Propriedades de trabalhabilidades do CAA e possíveis ensaios para mensura-las.

Propriedades	Método de teste		
	Laboratório - Execução do traço	Canteiro de obras - Teste de qualidade	Modificação no teste de acordo com tamanho máx. do agregado
Habilidade de preenchimento	<i>Slump flow</i>	<i>Slump flow</i>	Nenhum
	<i>T500 slump flow</i>	<i>T500 slump flow</i>	
	<i>V-funnel</i>	<i>V-funnel</i>	Máx. 20 mm
	<i>Orimet</i>	<i>Orimet</i>	
Habilidade passante	<i>L-box</i>	<i>J-ring</i>	Diferentes aberturas na L-box, U-box e J- ring
	<i>U-box</i>		
	<i>Fill-box</i>		
Resistência à segregação	<i>GMT test</i>	<i>GMT test</i>	Nenhum
	<i>V-funnel em T5min</i>	<i>V-funnel em T5min</i>	

Fonte: Adaptado de EFNARC, 2002.

A Tabela 5 resume os valores mínimos e máximos de acordo com ABNT NBR 15823-1:2017. Os valores limites devem ser respeitados para que o concreto seja classificado como CAA.

Tabela 5: Métodos de ensaio para CAA no estado fresco segundo a ABNT NBR 15823:2017

Espalhamento – Slump Flow (sob fluxo livre)		
Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	
Viscosidade plástica aparente – Slump Flow T500 (sob fluxo livre)		
Classe	t500 (s)	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
Vs 2	> 2	
Índice de estabilidade visual (sob fluxo livre)		
Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10mm) 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 (> 10mm)	
Habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)		
Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	
Habilidade passante pela caixa L – L Box (sob fluxo livre)		
Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL1	≥0,80, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-3
PL2	≥0,80, com três barras de aço	
Habilidade passante pela caixa U (sob fluxo confinado) - Ensaio facultativo		
Classe	Caixa U (H2 - H1)	Método de ensaio
PU	≤ 30mm	ABNT NBR 15823-4
Viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado)		
Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5
VF 2	9 a 25	
Resistência à segregação pela coluna de segregação		
Classe	Material retido na peneira (%)	Método de ensaio
TP 1	≤ 20	ABNT NBR

TP 2	≤ 15	15823-6
------	-----------	---------

Fonte: Adaptado de (ABNT NBR 15823:2017).

A Figura 4 com base na ABNT NBR 15823-2:2017, auxilia na determinação do IEV, mostrando uma vista em planta e corte longitudinal de uma ilustração de concreto.

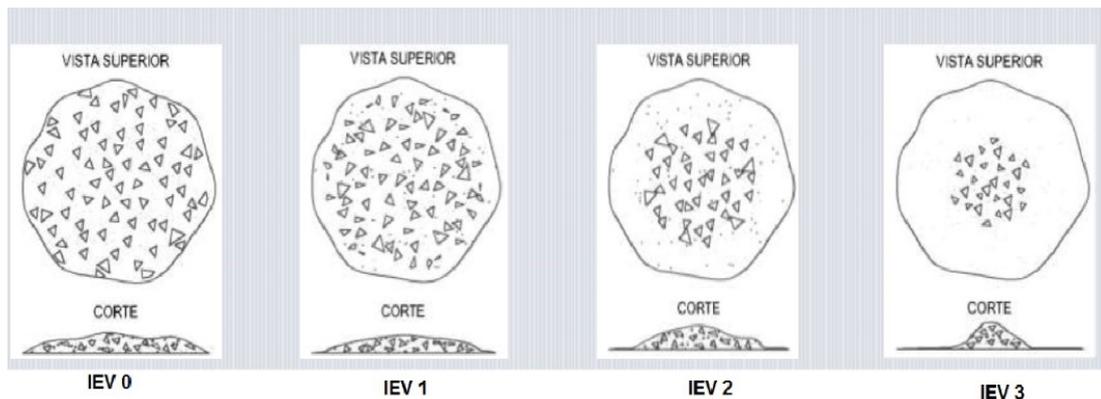


Figura 4: Classes de índices de estabilidade visual adaptado de (Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017).

2.1.3. CAA no estado endurecido

No estado endurecido, o CAA assim como os concretos convencionais está sujeito aos mesmos parâmetros de avaliação ou ensaios ditados pela associação brasileira de normas técnicas, tais como: ensaio de compressão, tração e flexão. As propriedades finais de todos concretos dependem diretamente do processo de dosagem, execução do concretagem e cuidados após a concretagem, como a correta realização da cura (TUTIKIAN, 2008).

O CAA no estado endurecido apresenta as mesmas características ou muito próximas dos concretos convencionais. As propriedades dos concretos no estado endurecido irão depender principalmente das proporções ou traços em que são dosados (ABCP, 2018).

Mas pode se destacar como características peculiares do CAA, o seu alto calor de hidratação. Que é devido na sua dosagem ser utilizado um alto consumo de cimento que por sua vez geralmente é do tipo de alta resistência inicial, podendo causar patologias como: expansões e fissuras na estrutura. Também pode ocorrer que o tempo de pega seja ligeiramente retardado por conta do uso de superplastificante (TUTIKIAN 2008).

O CAA pode apresentar redução no módulo de elasticidade e retração plástica também devido ao baixo consumo de agregado graúdo. Essas patologias têm maiores chances de

ocorrer no CAA, pelo fato de ter alto consumo de cimento ou material aglomerante. Adicionalmente, ocorre o uso de superplastificante e reduzido consumo de agregado graúdo. No entanto, é importante destacar que essas reações não são exclusivas do CAA, ficando qualquer tipo de concreto sujeito a essas patologias e diversas outras (TUTIKIAN 2008).

Para ilustrar o que foi dito pode se tomar o trabalho realizado por Manuel (2005) que relaciona o impacto do aumento do teor de argamassa (variando de 54% a 75%), juntamente com a relação água cimento, no módulo de elasticidade do CAA e resistência a compressão axial. O autor chegou à conclusão que teores a partir de 65% há uma queda no módulo de elasticidade quando compara o concreto convencional (CCV) ao CAA, como mostra a Figura 5. Esses resultados mostram que o CAA apresenta resistência mecânica (compressão axial e módulo de elasticidade) superior ao concreto convencional até determinado valor de teor de argamassa e relação água cimento.

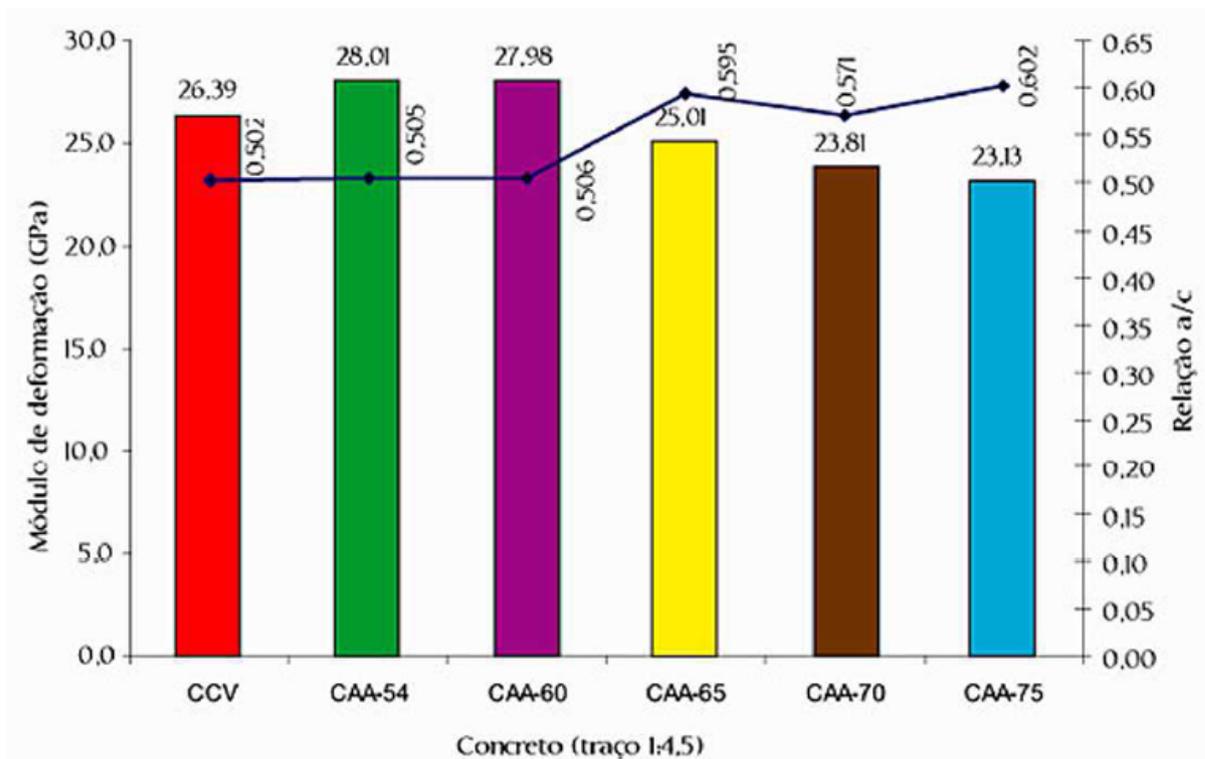


Figura 5: Módulo de elasticidade de CAA e CCV em função do teor de argamassa (Fonte: MANUEL, 2005)

2.1.4. Vantagens do CAA

O CAA é uma tecnologia que representa uma revolução no mundo do concreto, pois muda o modo de se trabalhar com esse material. O seu uso traz muitas vantagens

principalmente econômicas, técnicas e cronológicas de curto e de longo prazo (TUTIKIAN, 2008).

O CAA oferece uma taxa rápida de bombeamento, com tempos de construção mais rápidos e facilidade de fluxo em torno do reforço congestionado. A resistência à fluidez e à segregação do CAA garante um alto nível de homogeneidade, vazios mínimos de concreto e resistência uniforme do concreto, fornecendo o potencial para um nível superior de acabamento e durabilidade da estrutura. O CAA é frequentemente produzido com baixa relação água-cimento, proporcionando o potencial de alta resistência inicial, desmoldagem antecipada e uso por menor tempo de elementos e estruturas (EFNARC, 2002).

A eliminação do equipamento vibratório melhora o ambiente nos locais de construção e pré-fabricados próximos aos locais onde o concreto está sendo bombeado, reduzindo a exposição dos trabalhadores ao ruído e vibração. A prática e o desempenho aprimorados da construção, combinados aos benefícios de saúde e segurança, tornam a CAA uma solução muito atraente para a construção de concreto pré-moldado e diversos outros elementos estruturais da construção civil (EFNARC, 2002).

De forma resumida pode se citar as principais vantagens no uso do CAA (TUTIKIAN, 2008):

- Econômico: Agiliza a construção; diminui a mão de obra no canteiro; exclui o uso de vibradores. Com isso pode mitigar o custo total de concretagem e/ou da estrutura;
- Estético: Favorece o acabamento final da superfície; possibilita uma vasta liberdade de formas e dimensões; permite concretagens de estruturas de pequeno tamanho;
- Segurança: Maior segurança no canteiro de obras, em função da diminuição da mão de obra;
- Ambiental: Pode trazer benefícios ao meio ambiente, por possibilitar a utilização de resíduos.

Além disso, o uso do CAA em construção civil em comparação ao concreto convencional tem muitas vantagens, elas estão ligadas ao momento de execução da concretagem e no resultado final da estrutura de concreto (J. KANADASAN, 2015). Rwamamara e Simonsson (2012) destacam que o CAA trás benefícios psicológicos em

termos de diminuir o estresse do trabalhador, pois sua execução economiza tempo e além de ter o mínimo possível de ruído.

2.1.5. Aplicação e concretagem do CAA

Na maioria dos casos, o uso do CAA é empregado em estruturas especiais em que a concretagem convencional se torna inviável. Geralmente estruturas de difícil acesso, densamente armadas e que requerem maior controle de qualidade, no que se refere à homogeneidade (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015). O CAA pode ter grande uso na indústria de pré-moldados como também pode ser moldado in loco. Mas em razão da sua alta sensibilidade, neste último caso sua execução é mais restrita (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Acabamentos de superfície de alta qualidade é uma característica do CAA, mas para obter uma superfície sem furo, manchas ou descoloração, é necessário mais do que apenas concreto com bom design e qualidade da mistura. Atualmente, não existem orientações precisas sobre como obter de forma confiável e consistente, excelentes acabamentos de superfície usando o especificamente o CAA. No entanto, a face da forma de trabalho deve ser plana e limpa, e a execução do trabalho de cura e tratamento de acabamento deve ser da mais alta qualidade (EFNARC, 2002).

O bombeamento ou lançamento do concreto não deve ocorrer antes das verificações de controle. O teste recomendado para caracterizar o CAA no local é o *Slump Flow Test*. Esse ensaio fornece uma boa indicação da uniformidade do concreto. O ensaio de escoamento ou *Slump Flow Test* é uma medida da fluidez total e, portanto, da capacidade de enchimento do concreto. Uma avaliação visual para qualquer indicação de separação de argamassa/pasta na circunferência do fluxo e qualquer separação agregada na área central também fornece alguma indicação de resistência à segregação. O CAA pode ser colocado sob fluxo livre direto dos misturadores de caminhão betoneira, através de uma calha. Como alternativa, ele pode ser descarregado primeiro em um salto (com tubo de Tremie) ou em uma bomba (EFNARC, 2002).

Um exemplo de uso em larga escala do CAA como material estrutural é a ponte suspensa Akashi-Kaikyo, localizada no estreito de Akashi no Japão, inaugurada em abril de 1998, com um vão livre de 1991 m, na época, o maior do mundo. O CAA foi utilizado na concretagem dos dois blocos de ancoragem da ponte como é mostrado na Figura 6. Segundo

Okamura e Ouchi (2003) o concreto foi preparado e transportado por uma usina situada próxima ao canteiro de obras, em que o CAA foi lançado por tubos de uma altura de cerca de 3 metros, sem maiores problemas com segregação. De acordo com o autor, houve uma redução de aproximadamente 20% no tempo de execução da obra.



Figura 6: Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo (Fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003).

Na Figura 7 é mostrada uma extensa área horizontal de uma laje densamente armada. Em que foi utilizado CAA para a concretagem do Centro comercial em Ferrara, Itália.



Figura 7: Concretagem de laje no Centro Comercial em Ferrara, Itália (Fonte: EFNARC, 2002).

Importantes obras no Brasil utilizando CAA ocorreram na parceria entre profissionais ligados a universidades e o setor privado (TUTIKIAN, 2008). Pode se citar o edifício residencial na cidade de Goiânia, Goiás em 2004, pioneiro no uso de CAA (GEYER, 2005 apud TUTIKIAN 2008). Na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o Museu Iberê Camargo, na qual foi utilizado concreto branco (SILVA FILHO, 2004 apud TUTIKIAN 2008). E dois casos práticos controlados pela Comunidade da Construção, o primeiro em Santa Catarina e segundo no Rio Grande do Sul (REPETTE, 2005). É importante também destacar o uso de CAA nas empresas de pré-fabricados que fazem uso desta tecnologia em larga escala (TUTIKIAN, 2008).

2.1.6. Métodos de dosagem do CAA

Não existe um método padrão para o desenvolvimento do traço para CAA e muitas instituições acadêmicas, empresas de concreto usinado e pré-moldados desenvolveram seus próprios métodos de proporção de misturas. Os projetos de mistura ou traço geralmente usam o volume como um parâmetro-chave, devido à importância da necessidade de preencher os espaços vazios entre as partículas agregadas. Alguns métodos tentam ajustar os constituintes disponíveis a um conjunto de classificação otimizado. Outro método é avaliar e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta e, em seguida, das frações da argamassa. Isso antes da adição do agregado graúdo e de toda a mistura CAA misturada (EFNARC, 2005).

Citado no Guia Europeu para CAA (EFNARC, 2005), em ordem cronológica, alguns métodos básicos para o desenvolvimento de traços para CAA frequentemente utilizados no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e que tem sido publicado atualmente são:

- Okamura H and Ozawa K. *Self-compacting high performance concrete. International Workshop on High Performance Concrete. American Concrete Institute; Detroit. 1994;*
- Ouchi M, Hibino M, Ozawa K, and Okamura H. *A rational mix-design method for killing in self-compacting concrete. Proceedings of Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction. Taipei, Taiwan, 1998;*
- Nawa T, Izumi T, and Edamatsu Y. *State of the art report on materials and design of self-compacting concrete. Proceedings of International Workshop on*

Self-compacting Concrete. August 1998; Kochi University of Technology, Japan;

- Domone P, Chai H and Jin J. *Optimum mix proportioning of self-compacting concrete. Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Dundee, September 1999. Thomas Telford; London;*
- Billberg, P. *Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish Experience. Report no 2:99. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1999;*
- Su N, Hsu K-C and Chai H-W. *A simple mix design method for self-compacting concrete Cement and Concrete Research, 31, 2001;*
- Gomes P.C.C, Gettu R, Agullo L, Bernard C. *Mixture proportioning of high strength, Self-Compacting Concrete: Performance and Quality of concrete structures. Third CANMET/ACI, Conf. (Recefi, Brazil), 2002;*
- Bennenk, H. W. & J.Van Schiindel: *The mix design of SCC, suitable for the precast concrete industry. Proceedings of the BIBM Congress, 2002 Istanbul, Turkey;*
- Billberg, P. *Mix design model for SCC (the blocking criteria). Proceedings of the first North American conference on the design and use of SCC, Chicago 2002.*

Neste trabalho foi utilizado o método proposto por Tutikian (2008) que consiste em um método experimental e prático para dosagem de CAA. Contudo, para se chegar ao CAA proposto neste trabalho foi necessário também seguir algumas recomendações presentes na literatura e discutidos no Capítulo Método de dosagem e produção dos traços.

2.1.7. Microestrutura do CAA

Os três componentes da microestrutura de um concreto convencional, assim como para o CAA são: pasta de cimento hidratada, agregado e zona de transição na interface (ZTI), entre cimento e agregado (CALLISTER JR, 2016). O termo microestrutura é empregado para indicar a parte ampliada microscopicamente de uma macroestrutura. Com o advento de técnicas de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e microscopia eletrônica de

varredura (MEV) foi possível estudar a microestrutura de materiais na ordem de micrômetros (10^3 m) a nanômetro (10^9 m) (CALLISTER JR, 2016).

A microestrutura do concreto é heterogênea e altamente complexa. E as relações de propriedade da microestrutura no concreto ainda não estão totalmente desenvolvidas. O progresso no campo de materiais resultou principalmente do reconhecimento do princípio de que as propriedades se originam da microestrutura interna (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 8 mostra um exame de uma seção transversal de concreto por meio de um microscópio óptico. As duas fases que podem facilmente serem distinguidas são partículas agregadas de tamanho e forma variáveis, e o meio de ligação composto por massa incoerente da pasta de cimento hidratada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

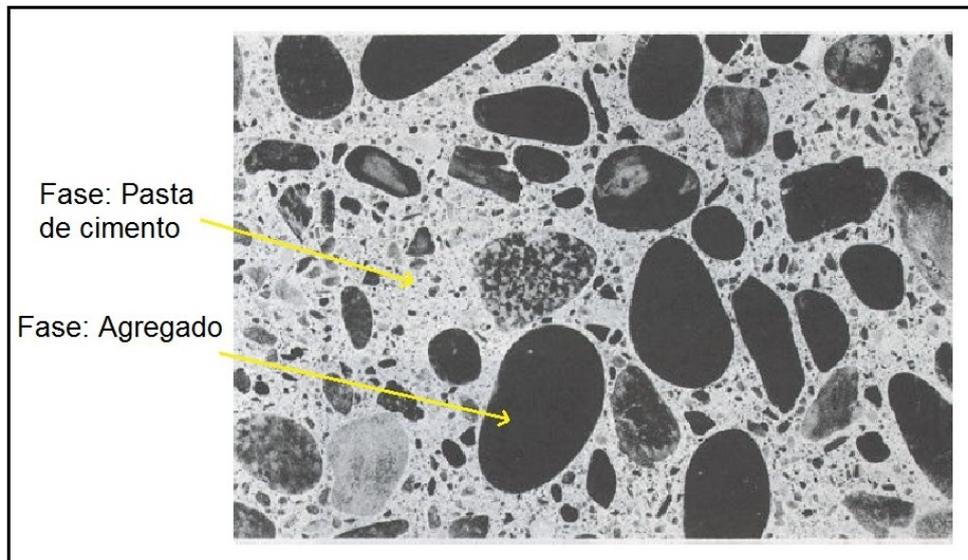


Figura 8: Seção polida de uma amostra de concreto por microscópio óptico (Fonte: Adaptado de MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Assim, as características únicas da microestrutura do concreto podem ser resumidas da seguinte forma: primeiro, a zona de transição na interface (ZTI), que representa uma pequena região próxima às partículas dos agregados graúdos. Existindo como uma “casca” fina, tipicamente com 10 a 50 μm de espessura ao redor de um agregado grande. A ZTI é geralmente mais fraca do que qualquer um dos dois principais componentes do concreto, ou seja, o agregado e a pasta de cimento hidratada; portanto, exerce uma influência grande no comportamento mecânico do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em segundo lugar, cada uma das três fases é em si uma multifase em caráter. Por exemplo, cada partícula agregada pode conter vários minerais além de microfissuras e vazios.

Da mesma forma, tanto a pasta de cimento hidratada a granel, os agregados e a ZTI, geralmente contêm uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. Terceiro, diferentemente de outros materiais de engenharia, a microestrutura do concreto não é uma característica intrínseca do material, porque os dois componentes da microestrutura, a saber, a pasta de cimento hidratada e a ZTI, estão sujeitos a mudanças com o tempo, umidade ambiental e temperatura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.1.8. Módulo de elasticidade do CAA

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é uma propriedade mecânica e representa a relação entre tensão e deformação de uma amostra, com isso é obtido a rigidez deste material. E ele define a tensão limite que um determinado material pode sofrer que não acarreta em danos permanentes na sua microestrutura. Ou seja, se uma estrutura for carregada além do estabelecido pelo módulo de elasticidade no regime elástico, essa estrutura entrará no regime plástico ou inelástico, sofrendo danos permanentes. No caso do concreto, esse dano leva a falha total da estrutura, uma vez que o concreto apresenta comportamento frágil. Se tratando de concreto, o módulo de elasticidade padrão varia de 14 GPa a 40 GPa. (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Na literatura existe o módulo de elasticidade estático e o dinâmico que são determinados por meio de técnicas diferentes. O módulo de elasticidade estático (E , razão entre tensão e deformação), é usado no cálculo da deflexão elástica como parâmetro de controle no cálculo elástico da deflexão, geralmente no projeto da laje e dos elementos pré ou pós-tensionados (EFNARC, 2005).

Como maior parte do volume de concreto é composta por agregado, o tipo e a quantidade de agregado, têm maior influência, na variação do valor de E . Selecionar um agregado com um alto valor de E aumentará o módulo de elasticidade do concreto. No entanto, aumentar o volume da pasta pode diminuir o valor E . Como o CAA geralmente possui um conteúdo de pasta mais alto do que o concreto vibrado tradicional, algumas diferenças podem ser esperadas e o valor E pode ser um pouco menor (EFNARC, 2005).

Na Figura 9 é mostrada uma curva tensão-deformação em que são definidos os comportamentos elástico (faixa linear) e plástico (curvatura). A Figura 9 representa o comportamento de uma amostra de metal, mas pode ser utilizado para entendimento de materiais frágeis, como o concreto que falham logo após o regime elástico.

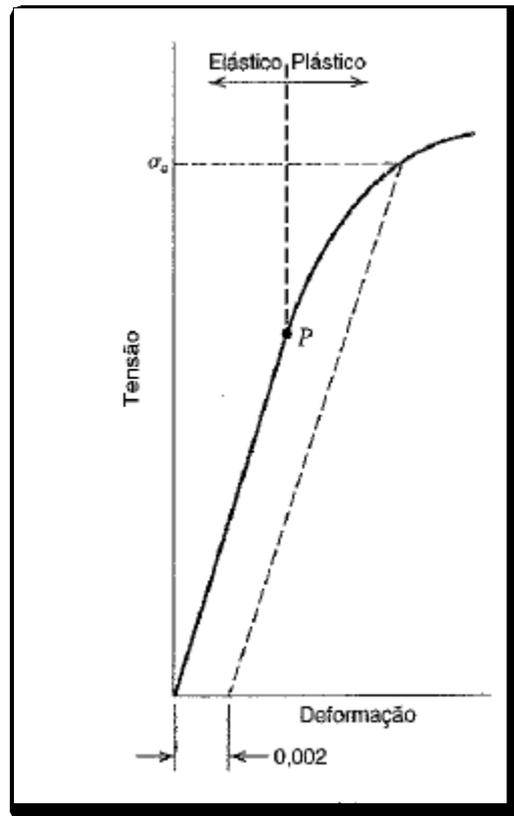


Figura 9: Comportamento tensão/deformação de uma amostra de metal submetida a crescente carregamento (Fonte: WILLIAN D. CALLISTER, 2002).

O concreto convencional, assim como o CAA não apresenta linearidade na curva tensão-deformação, em outras palavras, seu coeficiente angular na curva tensão-deformação é variável. Sabe-se que o concreto é um material compósito, constituído basicamente de agregados, cimento e água; conseqüentemente cada um desses materiais tem um comportamento diferente estando isolados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O concreto representa um comportamento médio dos seus materiais constituintes respeitando as devidas proporções. A Figura 10 ilustra a curva do concreto frente seus agregados.

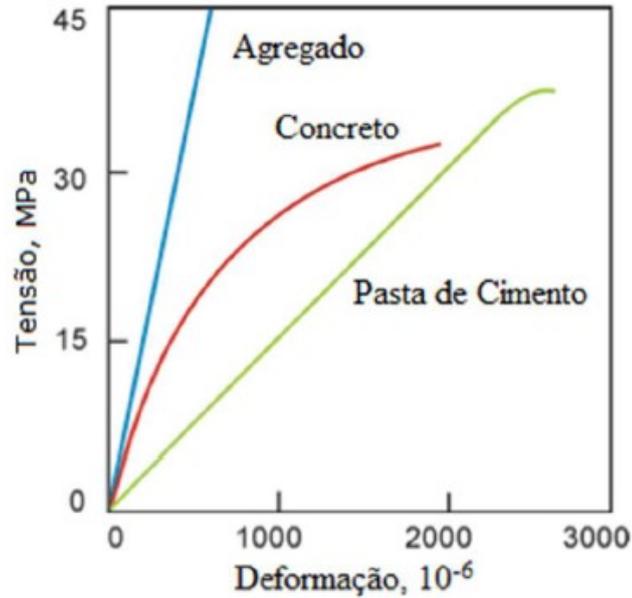


Figura 10: Comportamento típico da curva tensão-deformação para o concreto e seus principais componentes. (Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A característica de não linearidade dificulta e limita a determinação do módulo de elasticidade estático, pois são possíveis diferentes interpretações. As normas descrevem metodologias distintas, de modo que não há um consenso geral para sua determinação. Para prevê-lo pode ser empregado o módulo de elasticidade tangente ou secante, sendo que ambos podem variar de acordo com os locais da curva tensão-deformação considerados para sua determinação. Essa propriedade pode ser influenciada diretamente por aspectos experimentais e o tamanho da amostra analisada (NEVILLE, 2011). A Figura 11 exhibe diferentes formas de se obter o módulo de elasticidade estático por meio da curva tensão-deformação.

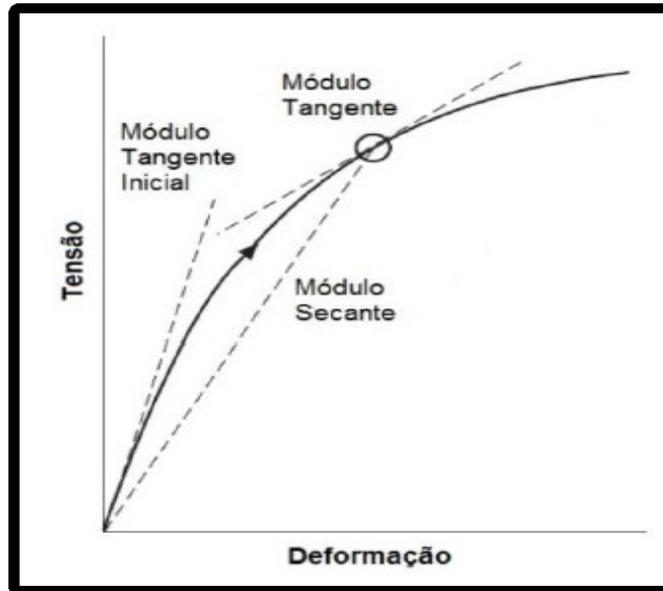


Figura 11: Diferentes formas de obtenção do módulo de Young a partir da curva tensão-deformação (Fonte: ALMEIDA, 2012).

Outro meio de determinar o módulo de elasticidade é pelo uso das frequências naturais de vibração ou na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Por meio dessa técnica o módulo de elasticidade é classificado como dinâmico. Sendo que os ensaios desta natureza são não destrutivos (ASTM E1876, 2015). Por meio da técnica não destrutiva pode-se ter certeza de se trabalhar no regime elástico, pois, as aplicações de tensão são insignificantes, não sendo capazes de produzir danos como microtrincas; e não ocorrendo o efeito da fluência (NEVILLE, 2011).

Assim como existe a estimativa do módulo de elasticidade por meio da resistência à compressão, obtido pela ABNT NBR 6118:2014. É possível fazer uma estimativa do módulo de elasticidade estático por meio do dinâmico com grande precisão. Para tal, pode ser empregado o modelo proposto por Popovics, (2008) que realiza uma previsão do módulo de elasticidade estático a partir do dinâmico (POPOVICS, 2008). Este modelo ser da década passada, atualmente no setor da construção civil, ele vem ganhando espaço, consistindo em uma alternativa viável para a estimativa do módulo de elasticidade estático (POPOVICS, 2008; PACHECO, 2014; CANESSO, 2008; HAACH, 2013).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado por meio das normas ASTM C215, (2014) e ASTM E1876, (2015). Nos seus cálculos é levado em consideração as dimensões, as massas e a frequência natural das amostras. A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) que foi utilizada neste trabalho é descrita por esses métodos e consiste na excitação do corpo de prova por meio de impacto. Os exemplos que mais se enquadram para a

utilização do módulo de elasticidade dinâmica são em aplicações em que ocorrem carregamentos súbitos da estrutura, como no caso de cargas variáveis oriundas de automóveis em ponte e viadutos (ALMEIDA, 2012).

2.1.9. Resistividade elétrica do CAA

A resistividade elétrica no concreto convencional, assim como no CAA representa a oposição do material a passagem de corrente elétrica (HALLIDAY, 2010). Em linhas gerais, o ensaio de resistividade se dá pela medição da diferença de potencial gerada pela passagem de uma corrente elétrica, aplicada nas extremidades superficiais de um corpo de prova (ABREU, 1998).

O conhecimento da resistividade no concreto permite prever o início do processo de corrosão de estruturas que estão expostas à presença de cargas de íons cloretos (PEREIRA, 2012). A avaliação da vida útil das estruturas é possível através de um mapeamento de pontos mais porosos do concreto, esses pontos por sua vez, permitem a passagem de corrente elétrica com maior facilidade, diminuindo a resistência do concreto a passagem de corrente elétrica (COSTA, 2017). É importante saber que o ensaio de resistividade elétrica do concreto não informa se há corrosão na estrutura, contudo informa sobre dados a cerca de futura possibilidade de deterioração ocasionada pela corrosão (COSTA, 2017).

Um concreto poroso facilita a passagem de corrente elétrica, ou seja, concretos porosos tendem a terem menores valores de resistividade elétrica. Diretamente ligado ao processo químico de corrosão está a umidade que pode ser obtida indiretamente com o ensaio de resistividade elétrica de uma material. Pois a umidade diminui a resistividade elétrica, facilitando a passagem de corrente (POLDER E PEELEN, 2002 apud COSTA, 2017).

A resistividade elétrica varia entre os materiais, pois cada material irá conduzir corrente elétrica de forma diferente e isso vai depender, entre outros aspectos de sua composição, umidade, temperatura e área superficial (HALLIDAY, 2010). Para materiais condutores é encontrado um valor de resistividade menor, se comparado aos materiais não condutores. Exemplo, um metal como o cobre possui valor de resistividade elétrica de $1,7 \times 10^{-8}$, já a borracha que é um material isolante possui resistividade de $1,0 \times 10^{13}$ que é muito superior ao cobre (VILLATE, 2013).

A Equação 1 mostra o equacionamento da resistividade elétrica que leva em conta características da natureza de cada material em análise. Essas características são: o comprimento L (m), a resistividade elétrica específica (ρ), e a seção transversal A (m²) (HALLIDAY, 2010).

Sendo:

$$R = \frac{(\rho L)}{A} \quad (1)$$

- R é a resistência elétrica (Ω/m);
- L é o comprimento (m);
- ρ é a resistividade elétrica específica do material ($\Omega.m$);
- A é a área de seção transversal (m²).

Os fatores que alteram a resistividade elétrica do concreto e que devem por consequência disso serem controlados, de maneira que não estejam variando muito nos respectivos dias de execução dos ensaios são: a umidade do ar, a temperatura, e o tempo de saturação da amostra (LAMOUNIER, 2014).

A saturação ou grau de saturação que se encontra um concreto tem grande influência na resistividade elétrica, pois com o aumento da umidade nos poros capilares a passagem de corrente elétrica é facilitada e assim a resistividade diminui. Esse fato aumenta significativamente a corrosão precoce da estrutura de concreto, diminuindo a sua vida útil (ABREU, 1998).

A temperatura é um fator que altera significativamente a resistividade elétrica ABNT NBR 9204:2012. No intervalo de $(24 \pm 4)^\circ\text{C}$ a variação chega aproximadamente de 3% a 5% para cada unidade de diminuição ou aumento de temperatura. Whiting e Nagi, (2003) apud Silva, (2016) em seu trabalho cita que a resistividade elétrica é decresce com o aumento da temperatura, pois, ela tem uma grande influência sobre a solução presente nos poros (rica em eletrólito). O aumento de temperatura diminui a viscosidade dessa solução, e aumenta a mobilidade iônica que facilita a passagem de corrente elétrica.

Um método de análise da resistividade elétrica bastante utilizado e que fornece resultados consistentes é o método de análise de resistividade elétrica volumétrico (LAMOUNIER, 2014). Esse método consiste no uso de dois eletrodos de cobre, os quais são posicionados nas extremidades da amostra. É então utilizado um osciloscópio para fazer a leitura da corrente alternada que atravessa a amostra com uma frequência estabelecida. Com os resultados informados é possível avaliar as quedas dos potenciais que ocorre entre os eletrodos. Como medida auxiliar no contato entre as superfícies é aconselhável empregar uma esponja de aço úmida (COSTA, 2017).

Na Figura 12 é mostrado o sistema de execução do ensaio do sistema de eletrodos com chapas de cobre que foi utilizado neste trabalho.

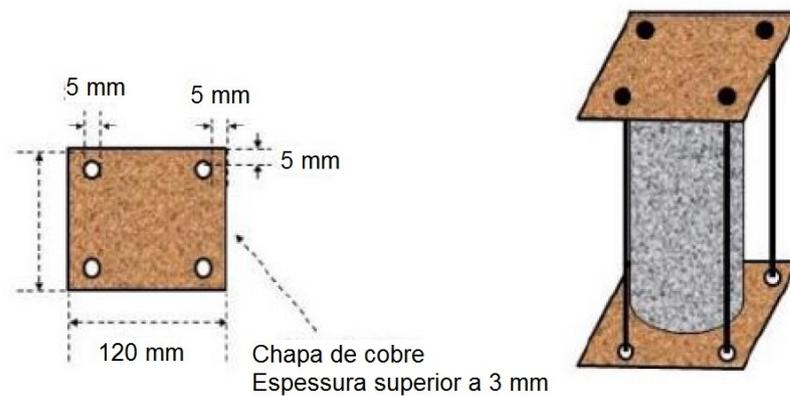


Figura 12: Sistema de eletrodos de chapas de cobre (Fonte: LAMOUNIER, 2014).

2.2. Resíduo oriundo do Setor eletroeletrônico

Os equipamentos do tipo elétrico e eletrônicos são comumente utilizados em residências, indústrias, comércios e serviços, e seu funcionamento se dá por meio de energia elétrica (ABINEE, 2019). Basicamente o setor de equipamentos eletroeletrônico é dividido em quatro grandes linhas de produtos. Como são mostradas na Figura 13, as linhas são denominadas, Linha Marrom, Linha Verde, Linha Branca e Linha Azul.



Figura 13: Linhas de produtos do setor eletroeletrônico (Fonte: Adaptado de SARAIVA, 2014).

Os bens de consumo que são do tipo Linha Branca pertencem à classe dos eletroeletrônicos de consumo não portáteis, duráveis e são eletrodomésticos de grande porte que tem a função de limpeza, preparo, cozimento e preservação de alimentos (ALCÂNTARA e ALBUQUERQUE, 2008).

2.2.1. Mercado dos refrigeradores no Brasil

A indústria de eletroeletrônico no Brasil apresentou na última década um crescimento significativo na venda de produtos. Pode se citar os principais fatores que impulsionam esse crescimento: diversidade de funcionalidades dos novos equipamentos, diminuição do custo final do produto, inovação tecnológica e diminuição do tempo de vida útil (SILVA, 2009). Na Figura 14 é mostrado o crescimento do número de domicílios com geladeiras no Brasil desde o ano 2001 ao ano 2013.

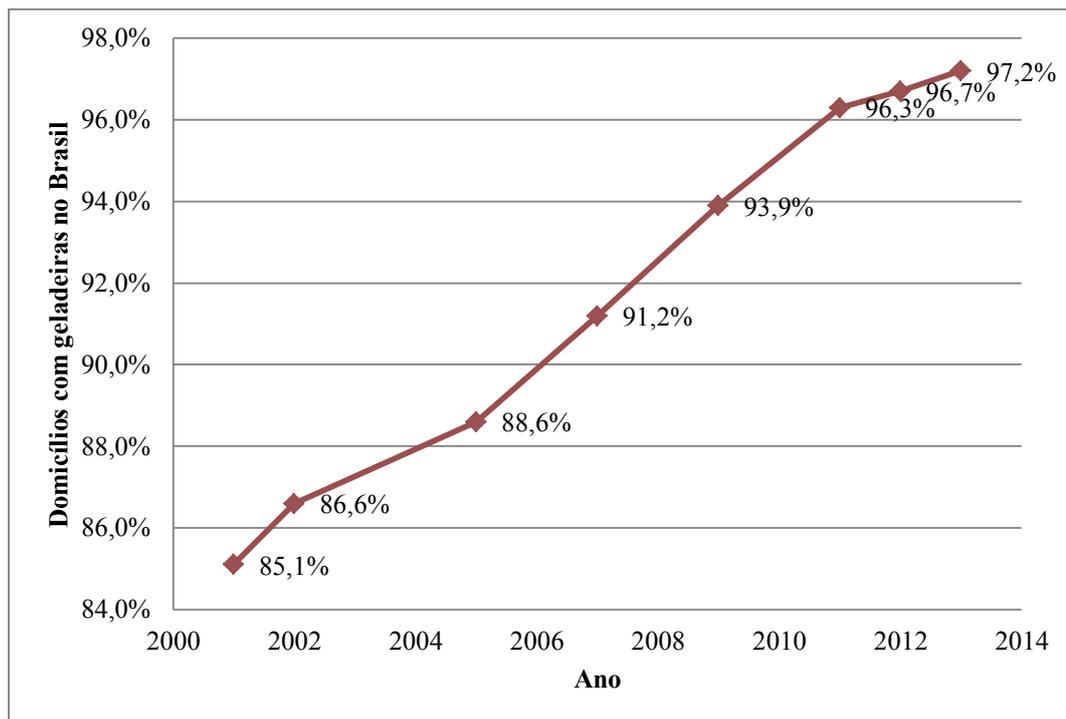


Figura 14: Crescimento do número de domicílios com geladeiras no Brasil (Fonte: DEPEC e BRADESCO, 2017).

A chegada dos primeiros refrigeradores do mercado brasileiro ocorreu no final da década de quarenta. Hoje o mercado de geladeiras brasileiro está entre os principais mercados do mundo, ficando somente atrás de países como EUA, China, Alemanha, Japão e Inglaterra. A fabricação de geladeiras apresenta uma grande contribuição para a economia do país, proporciona uma grande demanda interna, com a geração de empregos e vem sendo um dos produtos mais exportados (SILVA, 2009).

Os padrões produtivos a nível mundial são alterados pelas inovações, e os setores que apresenta alto dinamismo como o segmento de eletroeletrônicos é um dos mais afetados por essas inovações. As mudanças nos padrões de vida, associadas a essas constantes inovações gera um grave problema de descarte pós-consumo dos produtos associados à linha branca, e agravado pela ausência de políticas públicas voltadas para diminuir ou até solucionar esse problema (SILVA, 2009).

Sendo responsável por cerca de 90% da produção do setor da linha branca, os refrigeradores apresentam o mercado de maior concentração e impacto. A partir de 1998, no Brasil, houve a implantação de programas de eficiência energética para consumidores residenciais de baixa renda. Contudo, somente no ano de 2005 que de fato esses programas

foram colocados em prática, pois, se tornou obrigatório que cada concessionária investisse no mínimo 50%, do seu investimento anual em programas destinados a comunidades de baixa renda. Isso diretamente impulsionou a compra e/ou substituição de novos refrigeradores que possuíssem maior eficiência energética, equipamentos esses que fazem uso do clorofluorcarbono (CFC) nos seus sistemas de refrigeração por um custo mais baixo (SILVA, 2009).

É frequente no mercado da linha branca que as inovações ocorram baseadas majoritariamente no *design*, modelos e funcionalidades dos equipamentos, sem contudo afetar melhorias significativas que favoreçam o desempenho. A diminuição dos preços dos insumos, os constantes avanços tecnológicos e o lançamento de vários novos produtos levam a uma obsolescência precoce e grande custo no reparo. Todos esses fatores contribuem para um aumento da quantidade de bens descartáveis e proporciona a redução do ciclo de vida mercadológico dos produtos (SILVA, 2009).

2.2.2. Classificação e gestão dos resíduos sólidos

São muitas as variáveis que afetam a geração de resíduos, mas as que apresentam maior impacto são a densidade populacional e o poder aquisitivo. Relacionado ao poder de compra de uma população, pode se citar o produto interno bruto (PIB) como outro ponto indicador importante a ser levado em consideração (AWASTHI A.K., 2018). Visando a destinação ecologicamente correta que abrange desde o reparo, acondicionamento, reciclagem e recuperação de metais valiosos. Diversas práticas já estão sendo aplicadas no Brasil, no entanto é indispensável que todo processo se inicie pela correta coleta e destinação adequadas a partir do consumidor comum (XAVIER, LINS, *et al.*, 2018).

A ABNT NBR 10004:2004 classifica os resíduos sólidos em duas categorias com relação ao estado da matéria em resíduos sólidos e semissólido. Que tenham origem em atividades tal como: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e lodos de estações de tratamento de água (ETA). Bem como todo líquido que seu lançamento na rede pública ou corpos de água necessitem para isso de tratamento específico.

Quanto à periculosidade dos resíduos sólidos a ABNT NBR 10004:2004 classifica-os em três classes distintas: resíduos perigosos, resíduos não inertes e resíduos inertes. De acordo

com a lista de classificação para resíduos da resolução CONAMA (2002), o resíduo do presente trabalho é do tipo: resíduo polimérico proveniente da reciclagem de refrigeradores. Se enquadrando como classe II ou III, código A007 e A008: resíduos de plásticos polimerizados de processo e resíduos de borracha.

Os resíduos industriais por sua vez são definidos pela (PNRS, 2010) como aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais, resultantes de atividades industriais (atividades de pesquisas, transformações de matéria-prima em novos produtos, extração mineral, montagem e manipulação de produtos acabados) sendo que a destinação final desse resíduo é dever da indústria geradora. Os resíduos industriais podem ser encontrados nos estados sólido, semissólido, gasoso. E o processo de tratamento deste resíduo pode ser feito pelo próprio gerador internamente ou pode se optar pela contratação de serviços terceirizado, neste caso o tratamento é externo (PNRS, 2010).

O gerenciamento dos resíduos sólidos industriais devem obrigatoriamente obedecer aos princípios da não geração, minimização, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação final. Para tanto, devem atender as etapas de geração, coleta, armazenamento, transporte e a adequada destinação (tratamento ou disposição final). O processo de geração de resíduos como produto final na cadeia produtiva é inevitável nas indústrias, mesmo tendo realizado a minimização e otimização de processos produtivos. Um dos principais problemas enfrentados quanto aos resíduos sólidos atualmente é o seu incorreto armazenamento. Parte do problema é devido à falta de documentos que guiem a ação das industriais e é agravado ainda mais pelo grande número de classificação dos resíduos existentes (BORGES T., 2017).

A escassez de dados atualizados referentes à geração de resíduos sólidos industriais no Brasil torna limitada a ação do poder público quanto à tomada de medidas favoráveis a sustentabilidade (VENZON, CHICATTO, *et al.*, 2018). Em pesquisa realizada pelo IPEA (2017), aponta que no Brasil ocorre uma geração de resíduos sólidos urbanos em torno de 160 mil toneladas diárias e que 30 a 40% dessa quantia é material passível de reaproveitamento e reciclagem. Somente cerca de 13% destes resíduos são enviados para o setor de reciclagem, constituindo um setor pouco explorado pela indústria. Silva (2017) destaca que apesar dos números de reaproveitamento deste setor ainda serem baixo, ocorreu nos últimos anos ligeiros avanços, pelo menos no tocante a alguns materiais específicos. Entre o período de 1994 e 2008, o índice de reciclagem de papel subiu de 37% para 43,7%, o de vidro de 33% para 47%, o de latas de alumínio de 56% para 91,5%, o de embalagens PET de 18% para 54,8%, o de

lata de aço de 23% para 43,5%, e o de embalagem longa-vida de 10% em 1999 para 26,6% em 2008.

O poder público e os órgãos ambientais por meio da PERS, (2009) elegem soluções regionais ou locais tendo propósito de mitigar problemas relacionados ao controle ambiental. São recursos que buscam solucionar problemas ambientais tais como: o licenciamento e a fiscalização de sistemas, público ou privado, geração, coleta, transporte, armazenamento e tratamento de resíduos sólidos e disposição final de rejeitos. O correto armazenamento dos resíduos compreende a manutenção e a segurança de áreas para a sua operação e armazenagem (PERS, 2009).

Estudo elaborado pela FAPEMIG em parceria com a Fundação estadual de meio ambiente que resultou em um relatório que serve como guia para projetos e armazenamento de resíduos industriais em Minas Gerais. Aponta que estão entre os principais fatores que afetam negativamente o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil:

Ausência da diferenciação dos resíduos dos coprodutos, materiais requalificados por processos ou operações de valorização para os quais há utilização técnica ambiental e economicamente viável, sendo dispostos no meio ambiente.

Carência de base de dados disponíveis em nível nacional, em relação à geração, tratamento e disposição final dos resíduos industriais, para subsidiar o planejamento de ações; E insuficiência de locais para tratamento e disposição de resíduos sólidos industriais (BORGES T., 2017, p.12).

A Tabela 6 exibe informações no âmbito nacional de normas que regulamentam o gerenciamento dos resíduos sólidos e que são ferramentas que ajudam no controle e classificação dos resíduos industriais e de forma geral.

Tabela 6: Normalização nacional para o gerenciamento dos resíduos sólidos

Norma	Descrição
ABNT NBR 10004:2004	Resíduos sólidos - Classificação
ABNT NBR 10005:2004	Teste de lixiviação
ABNT NBR 10006:2004	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos
ABNT NBR 10007:2004	Amostragem de resíduos sólidos
ABNT NBR 11174:1990	Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes - Procedimento
ABNT NBR 12235:1992	Armazenamento de resíduos sólidos perigosos - Procedimento

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

2.2.3. Gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tem como tarefa a gestão dos resíduos sólidos no Brasil e faz a classificação dos REEE por meio da Lei nº 12.305 de 2010 e o Decreto nº 7.404 de 2010.

Somente na década passada que o poder público atuou em forma de lei estabelecendo responsabilidades quanto à gestão e destinação dos REEE. Em 2008 é publicada no Rio de Janeiro a Lei nº 4.969, que pela primeira vez, estabelece aos produtores responsabilidades pela gestão dos REEE. Também o licenciamento das atividades de destinação final que compreendem o tratamento e disposição final. Na sequência, nos anos de 2010 e 2013 é tornado público as normas técnicas a cerca do tema que são a ABNT NBR 15833:2018 (atualizada) e ABNT NBR 16156:2013, respectivamente. No ano de 2017, o Decreto nº 9.177 é publicado e regulamenta que seja realizado um acordo setorial firmado entre união e empresas para implantação do sistema de logística reversa por parte das empresas.

Os REEE apresentam diversidade em sua composição, pois, podem conter desde materiais valiosos até materiais perigosos. Por isso, na medida do possível deve se evitar o contato direto com esse tipo de resíduo, sem antes conhecer sua natureza. Somente os estado de São Paulo e Pernambuco possuem regulamentações específicas a cerca de restrições que devem ser tomadas com o manuseio desses equipamentos (XAVIER, LINS, *et al.*, 2018). Pela Lei nº 12.305 de 2010 e o Decreto nº 7.404 de 2010 são classificados REEE: aparelhos de ar-condicionado, lavadoras, fogões, fornos elétricos, fornos de micro-ondas, freezers horizontais e verticais, frigobares, refrigeradores (geladeiras), lava-louças e secadoras domésticas.

Há no território brasileiro várias empresas que realizam todo trabalho especializado de recuperação de gases utilizados na refrigeração, como CFC, bem como a destinação final adequada dos REEE no meio ambiente (XAVIER, LINS, *et al.*, 2018). Exemplos de empresas deste ramo são: Fox Reciclagem, Sinctronics, Lorene, Essencis, Ecotronic, Umicore.

Por meio do processo manual ou automatizado, na reciclagem do lixo eletrônico, seus componentes são separados e podem ser reutilizados ou encaminhados à transformação metalúrgica (ROBINSON, 2009). Para os eletrodomésticos que não podem ser consertados seus componentes reaproveitáveis são separados e utilizados na manutenção de outros equipamentos (KOSSAKA, 2004).

De forma geral, os materiais básicos usados na produção dos refrigeradores são metal 64%, plástico 31%, vidro 4% e outros 1% (SILVA, 2009). Nos refrigeradores cerca de 90% dos materiais que o compõem são recicláveis e no reaproveitamento ou reciclagem destes eletrodomésticos as partes de metais, vidros e plásticos são vendidas a empresas especializadas na reciclagem desses respectivos materiais. Produtos da linha branca em especial os refrigeradores precisam de cuidados especiais para seu descarte no meio ambiente, pois, podem contaminar o solo e a água, por meio dos metais pesados, polímeros e vidros que levam séculos para se decompor. E podem contaminar a atmosfera por meio dos gases tóxicos utilizados na refrigeração, como o gás CFC (clofluorcarbono) que está associado diretamente ao efeito estufa (KOSSAKA, 2004).

2.2.4. Logística reversa e gestão dos resíduos sólidos

No tocante a gestão dos resíduos sólidos classificados como REEE é importante comentar sobre a logística reversa. Segundo o art. 3º da Lei nº 12.305, de 2010 que regulamenta a PNRS (2010):

A logística reversa é o instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010, art3º).

A responsabilidade da logística reversa segundo o art. 3º da lei nº 12.305, de 2010:

É compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoante as atribuições e procedimentos previstos nesta Seção (BRASIL, 2010, art 30º).

E quanto à obrigatoriedade da logística reversa, o Art. 33. da lei 12.305/2010 deixa claro que:

São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de diversos produtos, entre eles produtos eletroeletrônicos e seus componentes (BRASIL, 2010, art 33º).

Na Figura 15 é ilustrado resumidamente como acontece o processo da logística reversa com a destinação ambiental correta dentro do ciclo de vida dos produtos.



Figura 15: Ciclo da logística reversa com a destinação ambiental correta dos resíduos (Fonte: Adaptado de PNRS, 2010)

Como pode ser observado na Figura 15, o ciclo de vida de um produto está ligado à logística reversa, uma vez que os produtos utilizados pelos consumidores podem ser reutilizados e voltam ao varejo. Que por sua vez, destina estes produtos reusados para as indústrias de matéria prima aproveitar em seus processos, gerando com isso um fluxo de negócios. Outro ponto em destaque na logística reversa, ilustrado na Figura 15 é a reciclagem dos produtos que foram consumidos e não podem ser reusados. Partes desses produtos são reciclados e voltam às indústrias, outra parte é destinado ao descarte ambientalmente correto que irá depender da natureza do produto (compostagem, incineração, aterro e lixão) (PNRS, 2010).

A logística reversa está ligada a todas as operações relacionadas à reutilização de produtos e materiais, se mostrando um tema bem amplo. Estão relacionadas com a logística reversa as atividades de coletar, desmontar e processar produtos ou materiais e peças com objetivo de proporcionar uma recuperação sustentável (REVLOG, 2002 apud CARELLI, 2016).

Há cinco questões básicas que a logística reversa lida, e elas podem ser resumidas da seguinte sequência e forma: Quais são as escolhas disponíveis para recuperar produtos, partes de produtos e materiais? Quem é o responsável por realizar as diversas atividades de

recuperação? Como devem ser realizadas essas atividades? As atividades de logística reversa podem ser integradas com os sistemas de distribuição e produção clássicos? Do ponto de vista econômico e ambiental, quais são os custos e benefícios da logística reversa? (LEITE, 2003 apud CARELI, 2016).

Os produtos depois de usados pelos consumidores, antes nunca foram motivo de preocupação para as empresas de manufatura. Esses produtos na maioria das ocasiões eram descartados pelos consumidores sem levar em conta os consideráveis danos ao meio ambiente. Nos dias atuais os consumidores e autoridades estão mais rigorosos com os fabricantes, que são cobrados por reduzir a geração de lixo proveniente da produção/manufatura (REVLOG, 2002 apud CARELLI, 2016). Contudo, esse novo pensamento só foi possível por meio de novas leis de gerenciamento de resíduos, que dão ênfase à recuperação dos resíduos, devido aos altos custos e danos ambientais do descarte incorreto. As empresas são forçadas por meio de leis ambientais a receber de volta seus produtos e cuidar de seu tratamento; ao reusar os produtos devolvidos no processo produtivo são obtidos alguns benefícios econômicos, somados a isso, há um crescimento do número de consumidores com maior consciência ambiental, principalmente o público jovem (REVLOG, 2002 apud CARELLI, 2016). As obrigações previstas na Lei 12.305 de 2010 são mostradas na Figura 16.

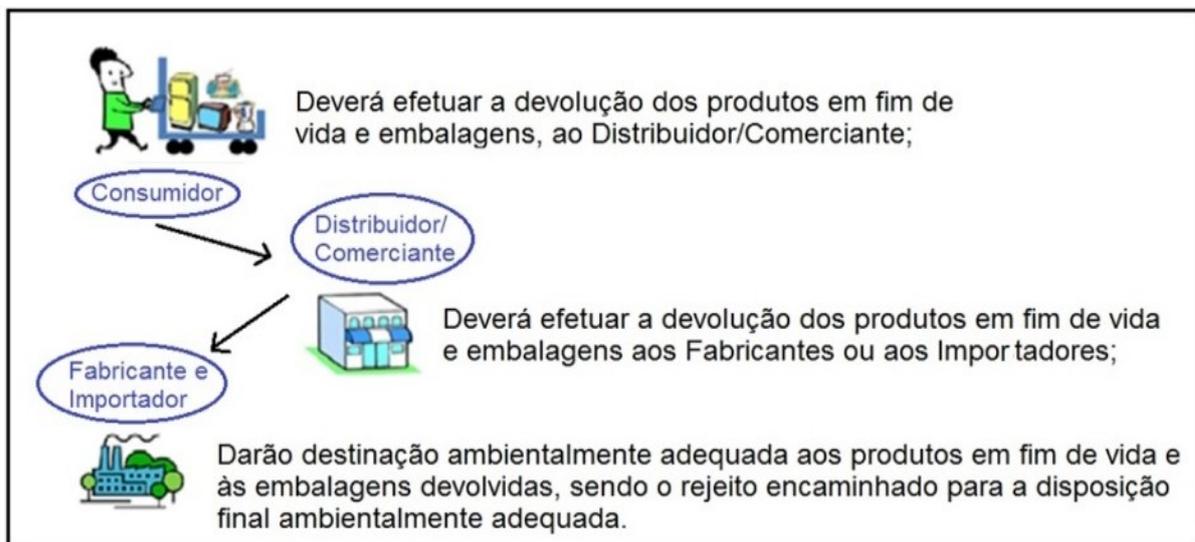


Figura 16: Obrigações da Lei: Política Nacional de Resíduos Sólidos (Fonte: BRASIL, 2010).

Existem dentro da logística reversa algumas opções para a recuperação de produtos que são: reuso direto, reparo e reciclagem. No reuso direto os produtos são limpos e recuperados de maneira que têm condições de retornar ao consumidor. No reparo, o produto é

consertado e retorna ao seu estado original. Na reciclagem, o objetivo é utilizar a totalidade ou parte dos materiais do produto devolvido. Os produtos reciclados e recuperados são utilizados no processo do produto original ou servem de matéria prima para outras indústrias (REVLOG, 2002 apud CARELLI, 2016).

Um termo usual no processo de reciclagem é o *Refurbishing* que diz respeito ao produto ser atualizado para que alcance padrões de alta qualidade e semelhantes operações ao produto original. E outro termo usual é remanufatura que consiste no desmonte dos produtos em módulos e parte que são avaliadas. As peças podem ser consertadas ou trocadas e o produto remanufaturado adquire uma avaliação de qualidade e as condições de produto novo com garantia (REVLOG, 2002 apud CARELLI, 2016).

2.2.4.1. Logística reversa e coleta seletiva

A logística reversa diz respeito à obrigação de estruturar sistemas que permitam o retorno de produtos manufaturados ao setor empresarial, exemplos desses produtos são: pneus, pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, eletrodomésticos, eletroeletrônicos. Essa obrigação é dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de determinados tipos de produtos, para que estes voltem ao setor empresarial e sejam reinseridos no ciclo produtivo ou encaminhados a destinação ambientalmente correta (MMA, 2019).

Então, pode se dizer que a logística reversa é uma obrigação do setor empresarial, principalmente os resíduos que são em sua maioria de natureza perigosa. Por outro lado, a coleta seletiva é responsabilidade dos titulares dos serviços de manejo de resíduos sólidos (poder público). E diz respeito à coleta diferenciada ou separada de resíduos organizados segundo sua composição ou constituição. Os resíduos semelhantes são colocados e coletados juntos pelo gerador que pode ser um cidadão, indústria privada ou instituição pública (MMA, 2019).

2.2.5. Ciclo de vida dos refrigeradores

A maior parte dos produtos manufaturados possui um ciclo de vida que se constitui das diversas etapas para se chegar ao produto final que abrange a extração da matéria prima, processamento, manufatura, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção e disposição final. Ao se analisar o ciclo de vida de um determinado produto é possível se ter uma visão ampla e geral de todas as etapas do processo produtivo, consumo e destinação final. Além de

ter um ponto de vista adequado ambiental e econômico para se minimizar os diversos impactos gerados ao meio ambiente (PESSOA FILHO e COSTA, 2014). A Figura 17 mostra o ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos desde o fornecedor da matéria prima a disposição final adequada.



Figura 17: Ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos (Fonte: Adaptado de ABINEE, 2019).

Em média no Brasil os refrigeradores possuem tempo de vida útil estimado de 10 a 15 anos. Sabendo disso e com a análise de seu ciclo de vida é possível fazer uma avaliação dos impactos gerados no início do processo de produção, utilização de matéria prima, fabricação, transporte e utilização deste produto no mercado consumidor, concluindo com seu descarte final (PESSOA FILHO e COSTA, 2014).

O ciclo de vida de um produto na logística reversa termina quando este produto recebe descarte final adequado, de modo que possa ter ocorrido sua recuperação, remanufatura e retorno ao mercado de forma integral ou partes de seus componentes que podem ter sido reaproveitados e reciclados (GARCIA, 2006).

Pelo fato dos refrigeradores serem equipamentos eletrônicos que estão presentes em quase a totalidade das residências brasileiras e permanecerem constantemente ligados, eles representam uma das maiores participações no consumo residencial de eletricidade. Por isso, é importante aumentar a eficiência desses equipamentos que trará benefícios ambientais e econômicos, uma vez que se contribuirá na conservação de recursos naturais, bem como na redução do potencial de degradação do ambiente e diminuição da necessidade de

investimentos na expansão do parque de geração de eletricidade (MELO e JANNUZZI, 2008).

Aspectos legislativos logísticos e socioambientais devem ser levados em conta na avaliação da situação do processo produtivo e definição da viabilidade das etapas do ciclo de vida dos produtos (SILVA, 2009).

2.2.6. Fases da reciclagem dos refrigeradores na indústria Fox

O resíduo polimérico adicionado no concreto desta pesquisa veio da Indústria Fox Reciclagem que é uma empresa de origem Alemã com base em diversos estados no Brasil com unidades em São Paulo, Ceará, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás. Foi fundada em 2009 para operar a primeira fábrica de produção reversa de refrigeradores na América do Sul (INDUSTRIAFOX, 2010).

A Indústria Fox presta serviços de triagem, tratamento e reciclagem de todos os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Faz um tratamento seletivo para diversas classes de REEE, e mantém linhas especializadas por tipos de equipamentos. Segundo a INDUSTRIAFOX (2010), todos os seus procedimentos atendem às normas brasileiras ABNT NBR 15833:2018 e ABNT NBR 16156:2013. Seus trabalhos na área de reciclagem são submetidos a auditorias externas de entidades credenciadas na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), e utilizam a legislação europeia, definido em sua última versão na diretiva 2012/19/UE (WEEE *Directive*), como benchmark. Como mencionado pela empresa, todos os processos de reciclagem alcançam valores bem maiores do que indicado pelas legislações e normas referenciadas (INDUSTRIAFOX, 2010).

Como lista orientativa segue uma classificação de equipamentos elétricos e eletrônicos que a Indústria Fox recebe: grandes eletrodomésticos de linha branca, grandes eletrodomésticos de refrigeração, médios eletrodomésticos, pequenos eletrodomésticos, equipamentos de informática e de telecomunicações, monitores de tubo, monitores LCD, equipamentos de consumo, televisores de tubo, televisores LCD, equipamentos de iluminação, equipamentos de iluminação com substâncias nocivas, ferramentas elétricas e eletrônicas, equipamentos eletrônico de esporte e lazer, aparelhos médicos, instrumentos de monitoramento e controle, distribuidores automáticos (INDUSTRIAFOX, 2010).

As formas de se reciclar aparelhos elétricos e eletrônicos variam de empresa para empresa, no entanto, um layout padrão é adotado pela maioria das indústrias como forma de otimizar todo o processo de reciclagem. A Industriafox, 2010, por exemplo, segue basicamente as seguintes etapas para a reciclagem que se inicia no recebimento do refrigerador e colocação em esteiras transportadoras para a retirada de gases nocivos ao meio ambiente, especialmente os gases de efeito estufa. Esses gases são os responsáveis pela refrigeração. A etapa posterior é a desmontagem dos componentes, trituração e separação. Os resíduos em forma de partículas gerados nesta etapa são então encaminhados por esteiras automatizadas aos pontos de coleta. Uma última fase é destinada a purificação dos gases de efeito estufa para sua liberação ao meio ambiente. Na

Figura 18 é mostrado um resumo das fases da reciclagem que os refrigeradores recebem na indústria FOX Reciclagem.

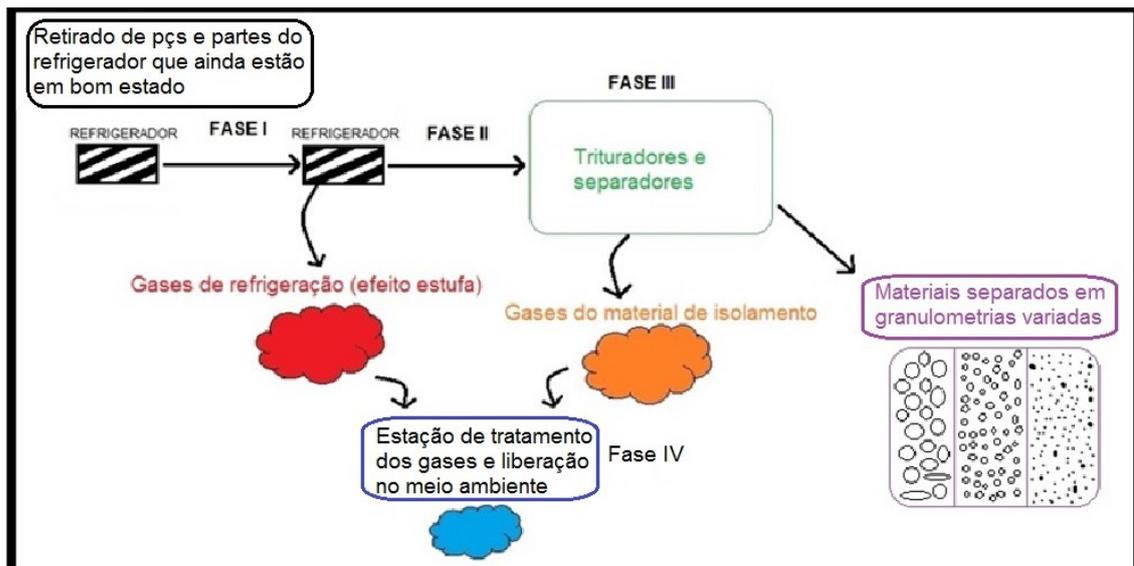


Figura 18: fases de reciclagem dos refrigeradores na indústria FOX (Fonte: próprio autor).

Na Tabela 7 são mostradas as etapas que são seguidas pela Industriafox (2010) para a reciclagem dos refrigeradores de forma simplificada.

Tabela 7: Etapas da reciclgem de refrigeradores

Fases	Etapas
Fase I	Retirada de peças e partes do refrigerador em bom estado.
	Preparação da geladeira para reciclagem com captação de gases de efeito estufa.
	Desmontagem e desgasificação dos circuitos de refrigeração.
Fase II	Estação de trituração, separação e desgasificação do isolamento.
	Separação dos materiais.
	Desgasificação do material de isolamento.
Fase III	Tratamento dos gases de efeito estufa.

Fonte: Adaptado de INDUSTRIAFOX, 2010.

Na Figura 19 e Figura 20 é mostrado de forma resumida as sequência de etapas para reciclagem de refrigeradores adotada pela (INDUSTRIAFOX, 2010).



Figura 19: Reciclagem dos refrigeradores indústria FOX (Fonte: Adaptado de INDUSTRIAFOX, 2010).

Na etapa A ocorre a retirada e separação de peças em bom estado; na etapa B ocorre a preparação e posicionamento dos refrigeradores para reciclagem; na etapa C ocorre a retirada

dos gases de efeito estufa dos refrigeradores; na etapa D a Geladeira é encaminhada para a trituração.

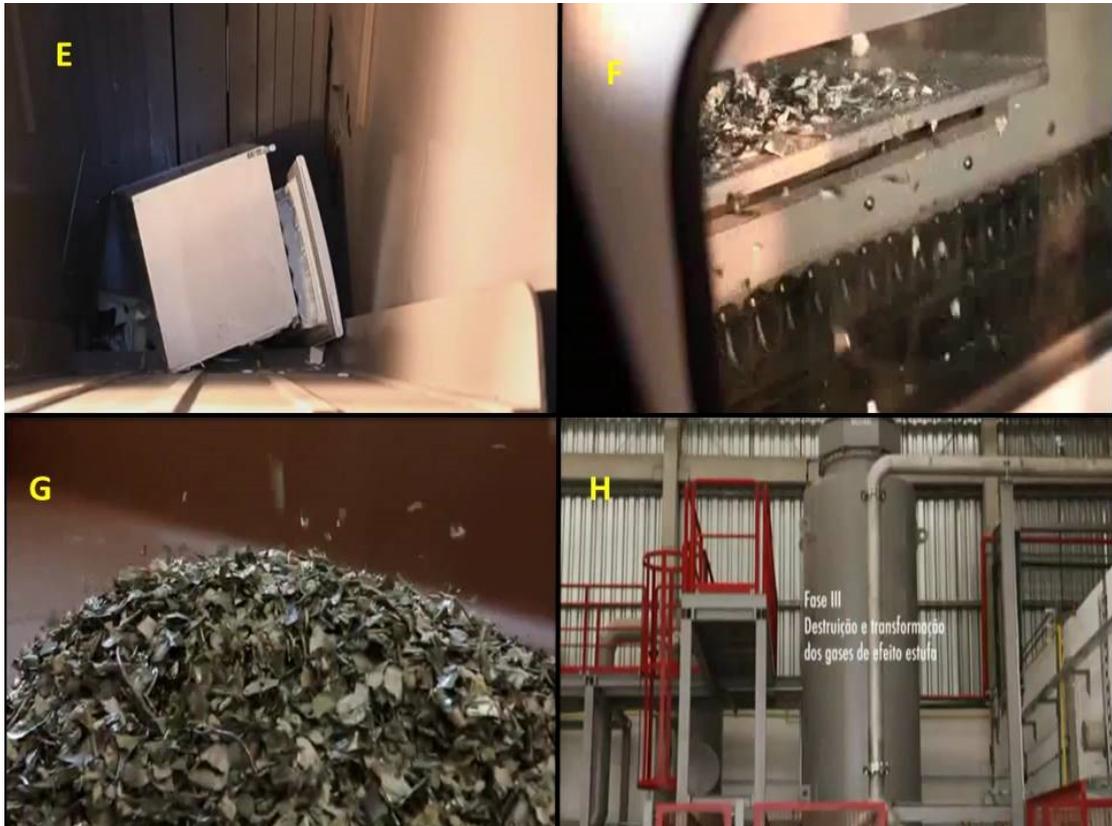


Figura 20: Reciclagem dos refrigeradores indústria FOX (Fonte: Adaptado de INDUSTRIAFOX, 2010).

Na etapa E a geladeira é triturada; na etapa F ocorre a separação dos materiais; na etapa G o material é separado; e na etapa H é mostrado os tubos e tanques para a tratamento dos gases de efeto estufa.

Pelo exposto, uma vez que o concreto é um material muito usado e os resíduos poliméricos de eletroeletrônicos sendo produzidos em alta escala, este trabalho visa obter um produto final que alie o uso do concreto que tenham em sua composição resíduo polimérico proveniente de refriradores.

2.3. Estado da arte

2.3.1. Pesquisa nacional do CAA com resíduo

Referente ao estudo do CAA com resíduo é possível separar polos/regiões de pesquisas de acordo com os pesquisadores doutores atuantes no Brasil. A Tabela 8 apresenta

os principais pesquisadores, a partir de 2015, registados no CNPq. A Tabela 8 apresenta um levantamento do nome, instituição e região dos principais pesquisadores nacionais do tema CAA. Os operadores lógicos utilizados na base de dados da CNPq foram: (concreto autoadensável) OR (concreto autoadensável resíduo).

Tabela 8: Principais pesquisadores nacionais do tema CAA com resíduo

	Nome	Instituição	Região
1	Cherif Malik	Federal de Santa Catarina	Sul
2	Luísa Andréia Gachet Barbosa	Universidade Estadual de Campinas UNICAMP	Sudeste
3	Rosa Cristina Cecche Lintz	Universidade Estadual de Campinas UNICAMP	Sudeste
4	Denise Carpena Coitinho Dal Molin	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Sul
5	Eduardo de Moraes Rego Fairbairn	Universidade Federal do Rio de Janeiro	Sudeste
6	José Luiz Pinheiro Melges	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho	Sudeste
7	Marcelo Henrique Farias de Medeiros	Universidade de Pernambuco	Nordeste
8	Ana Paula Kirchheim	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Sul
9	Janaíde Cavalcante Rocha	Universidade Federal de Santa Catarina	Sul
10	Guilherme Chagas Cordeiro	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro	Sudeste
11	Rafael Giuliano Pileggi	Universidade de São Paulo USP	Sudeste
12	Jardel Pereira Gonçalves	II da Universidade Federal da Bahia	Nordeste
13	Fernando Pelisser	Universidade Federal de Santa Catarina	Sul
14	Romildo Dias Toledo Filho	Universidade Federal do Rio de Janeiro	Sudeste
15	Jorge Luís Akasaki	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho	Sudeste
16	Bernardo Fonseca Tutikian	Universidade do Vale do Rio dos Sinos	Sul
17	Angela Borges Masuero	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Sul
18	Joao Adriano Rossignolo	Universidade de São Paulo USP	Sudeste
19	Maria Teresa Paulino Aguilar	Universidade Federal de Minas Gerais	Sudeste
20	André Luis Christoforo	Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)	Sudeste
21	Josy Antevelli Osajima Furtini	Universidade Federal do Piauí	Nordeste

Fonte: CNPQ, 2019.

2.3.2. Pesquisa internacional do CAA com resíduo

Para melhor compressão da distribuição mundial referente aos principais pesquisadores e países, ligados a pesquisa do CAA com resíduo. Foi realizado um levantamento na base de dados SCOPUS, do período de 2015 a 2019.

Os operadores lógicos utilizados na pesquisa foram: *Title-abs-key ((self and compacting and concrete and residue) or (self and compacting and concrete and waste and recycled) or (self and compacting and concrete and rubber) or (self and compacting and concrete and polymer)) and pubyear > 2014*. Essas palavras chave fazem uma busca que incluem: CAA com resíduo em geral, CAA com resíduo reciclado, CAA emborrachado e CAA com polímero.

A base Scopus foi escolhida para busca de artigos por ter grande relevância na comunidade acadêmica e elevado alcance. Além do mais, suas opções quanto ao tratamento dos dados são diferenciadas e isso fornece meios para se fazer uma análise sistemática do tema de pesquisa. A Figura 21 mostra o número de documento por ano. Esses documentos podem incluir: artigos, conferências, livros e capítulos de livros.

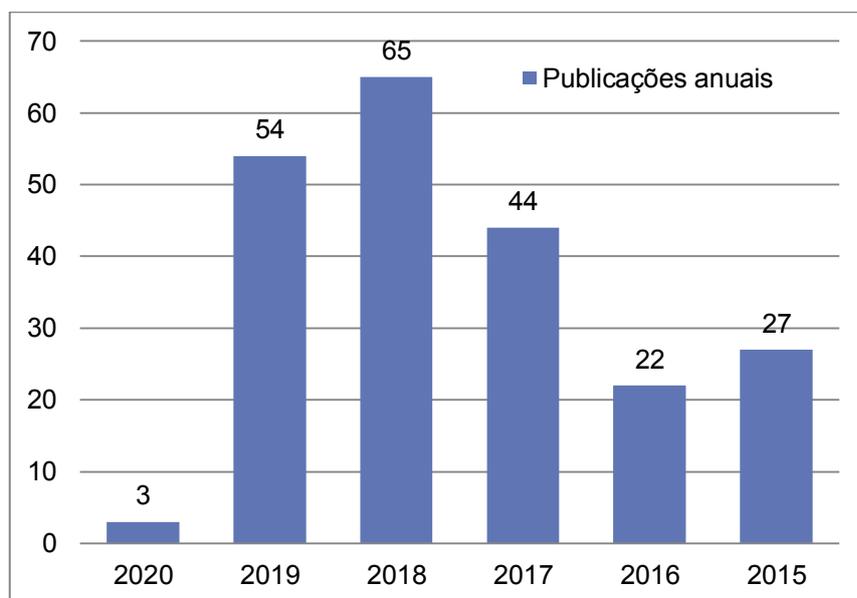


Figura 21: Publicações referentes ao tema CAA com resíduo no período de 2015 a 2020 (Fonte: SCOPUS, 2019).

Os principais periódicos de 2015 até 2020 que serviram e servem como fonte para publicação do tema CAA com resíduos é listado a seguir: *Construction And Building Materials, Journal Of Cleaner Production, Iop Conference Series Materials Science And Engineering, Matec Web Of Conferences, Indian Concrete Journal, Composite Structures, Engineering Structures, International Journal Of Civil Engineering And Technology* (SCOPUS, 2019). A Figura 22 trás os principais autores que publicam na área do CAA com resíduo.

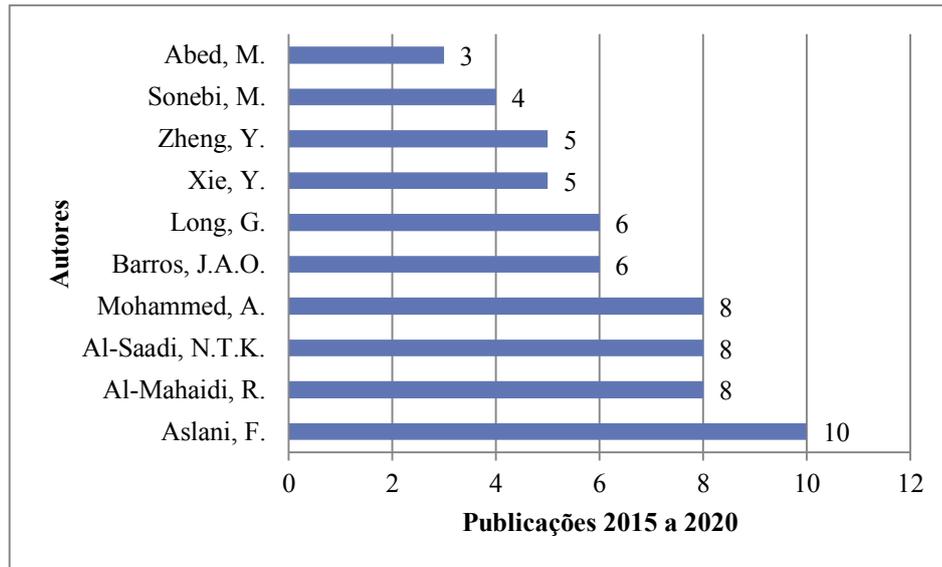


Figura 22: Principais autores que publicam na área do CAA com resíduo (Fonte: SCOPUS, 2019).

A Figura 23 mostra os principais países onde ocorrem trabalhos relacionados ao CAA com resíduo.

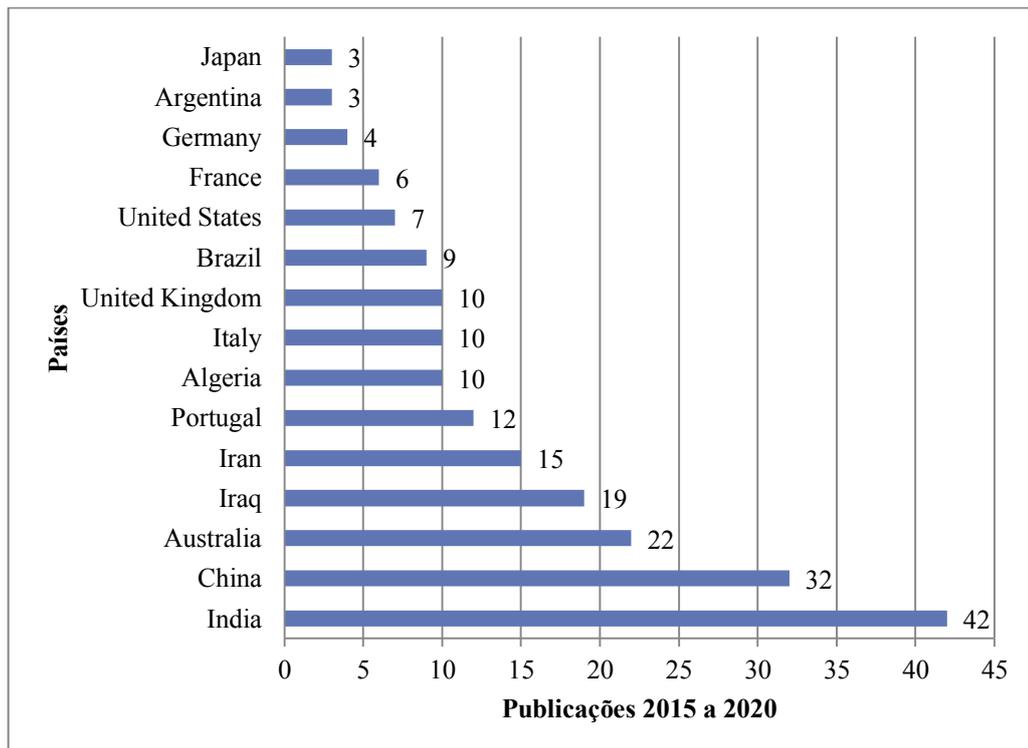


Figura 23: Principais países onde ocorrem trabalhos relacionados ao CAA com resíduo (Fonte: SCOPUS, 2019).

Pelo exposto, já existem muitas pesquisas sobre CAA e sobre adição e/ou substituição de resíduos demonstrando que o tema é atual e relevante. No entanto, a utilização de resíduo polimérico de refrigerados substituindo proporções da brita não foram encontrados trabalhos.

Como para a produção de CAA ocorre o aumento percentual de finos, grande parte das pesquisas são voltados para a substituição de finos. Neste caso, a opção foi utilizar o resíduo na forma como recebido, ou seja, como produzido durante o processo desmanche na indústria Fox. Sem custos adicionais de nova moagem.

2.4. Revisão da literatura

Vários estudos têm sido conduzidos envolvendo resíduos sólidos reciclados de origem polimérica na adição ou substituição de agregados de concreto. Assim, para esta etapa foram separadas alguns trabalhos publicadas nos últimos 5 (cinco) anos que fizeram uso de resíduos de origem polimérica em CAA. Um resumo com as principais contribuições de cada trabalho é realizado nos próximos parágrafos.

Mohammeda (2019) objetiva em seu trabalho, substituir uma parte do agregado convencional por agregado de PVC em concreto convencional. Encontra que essa substituição tem baixo efeito nas propriedades físicas do concreto, bem como redução da trabalhabilidade com alto teor de PVC. O módulo elástico de concreto é consideravelmente deteriorado com o aumento do agregado de PVC. Por fim, a resistência à abrasão é melhorada à medida que parte do agregado natural é substituído. Conclui que existe a chance de usar 30% de agregado de PVC em concreto sem alterar significativamente as propriedades do concreto.

Aslani (2018) seus colaboradores buscam produzir e caracterizar CAA com adição de resíduos de borracha de pneu e resíduos de concreto reciclado de construções e demolições. Segundo o autor essa é uma alternativa sustentável para a minimização do impacto a danos associados à extração e esgotamento de recursos naturais. As misturas de CAA propostas foram capazes de reduzir a quantidade de cimento usado em 40%. Além disso, à medida que a porcentagem de substituição de agregados reciclados aumentou, o CAA desenvolvido teve sua capacidade de passagem ou fluidez diminuída.

Angelin (2018) com objetivo de analisar CAA produzidos com agregados leves e reciclados verificou que os CAA produzidos apresentaram coesão e trabalhabilidade adequados, bem como atendem as condições normativas para uso em peças pré-moldadas e estruturais. Todas as misturas apresentaram coesão e consistência adequadas para o manuseio e moldagem, além da manutenção da trabalhabilidade. De acordo com os resultados obtidos

nos ensaios no estado fresco, todos os concretos produzidos na pesquisa podem ser caracterizados como autoadensáveis. Houve uma queda de resistência mecânica do CAA sem resíduo para o CAA 5% de resíduo, porém, houve um acréscimo do CAA 5% para o CAA 10%. Para as dosagens desenvolvidas nesta pesquisa, o melhor empacotamento dos grãos de borracha ocorreu no traço CAA 10%, pois apresentaram melhores valores de resistência mecânica; quanto aos valores de massa específica, todos os traços apresentaram valores acima de 2000 kg/m³, ou seja, os concretos produzidos não podem ser caracterizados como leves.

Hama e Hilal (2017) investigam a efetividade do uso de resíduos plásticos como substituição parcial do agregado miúdo sobre as características do CAA. Os resultados experimentais mostram que os resíduos plásticos com os tamanhos e conteúdos propostos podem ser utilizados com sucesso como um agregado fino em concreto autoadensável.

Girskas e Nagrockiene (2017) buscaram produzir concreto convencional com adição de borracha de pneu em substituição à areia. Os resultados mostraram que a resistência à compressão tem redução de 68% a 61,3%. No entanto, o teor mais alto de borracha fragmentada na mistura reduz a relativa densidade de poros e paredes capilares.

Al-Hadithi e Hilal (2016) em seu trabalho desenvolveram concreto autoadensável com adição de fibras plásticas residuais resultantes de corte de garrafas de bebidas. Os resultados mostram que as fibras tem um efeito adverso sobre as propriedades frescas e melhorias foram encontradas nas propriedades endurecidas do CAA.

Sadrmomtazi (2016) buscou incorporar resíduos particulados de polietileno tereftalato (PET) em CAA e realizou estudos reológicos, mecânicos e de durabilidade para avaliar suas propriedades. Os resultados apontam que os resíduos de PET não interferem significativamente na resistência elétrica do concreto, mas afeta negativamente a resistência à compressão e torna o concreto mais frágil. O autor conclui que o uso do PET em CAA reduz problemas ambientais, protegendo os recursos naturais e diminuindo a carga de edifícios devido a baixa massa específica do concreto resultante.

Ghernouti (2015) investiga em seu trabalho a incorporação de fibras de plástico no CAA. Sendo essas fibras provenientes de sacos plásticos de embalagem alimentícia. Os resultados mostram que as misturas satisfazem os critérios avaliados em estado fresco do concreto, independentemente do teor de fibras. O autor conclui que é interessante o uso deste tipo de fibra no reforço de estruturas de concreto. A presença de resíduos plásticos se mostrou

favorável para minimização da ocorrência de microtrincas. Embora a incorporação de resíduos plásticos não influencie significativamente a melhora na resistência à compressão e tração.

Thomas e Gupta (2015) realizam pesquisa a cerca do uso de borracha de pneu reciclado, como substituto parcial do agregado fino natural em concreto de alta resistência (CAR). Foram encontrados como resultados que a profundidade de penetração de água do concreto emborrachado foi menor que a da mistura de controle, enquanto a resistência à abrasão e absorção de água (até 10% de substituição) apresentaram melhores resultados que o concreto de controle. Assim sendo, o concreto emborrachado pode ser usado em estruturas onde há chances de falha frágil. Borracha moída de pneu pode ser utilizada em concreto de alta resistência como um substituto parcial do agregado fino até 12,5% em peso para obter resistência acima de 60 MPa.

Kumayama (2015) estuda a viabilidade técnica da utilização do pó de mármore como finos, na confecção de CAA. Juntamente com a substituição de parte dos agregados graúdos e miúdos por poliestireno expandido (EPS). Dos ensaios no estado fresco foi observado que a incorporação gradativa de isopor EPS e pó de mármore contribuiu para o aumento dos valores de viscosidade do concreto. De modo a minimizar os efeitos de segregação e de exsudação, compensado a baixa retenção de água pelo pó de mármore. Os resultados no estado fresco se apresentaram de modo a validar as propriedades requeridas para o CAA. No estado endurecido foi observado a diminuição dos valores de resistência à compressão axial e diametral, e o aumento dos valores da absorção, com o incremento do teor de EPS. Percebeu-se que a variação dos valores das propriedades mecânicas se deu de modo aproximadamente linear, oferecendo o indicativo de um modelo para a variação do comportamento mecânico, quando considerado o teor de EPS adotado em substituição.

Aliabdo (2012) apresenta em seu trabalho de pesquisa uma investigação experimental sobre as propriedades do concreto autoadensável (CAA) com adição de polímero. Como resultados têm se que a borracha de estireno butadieno (SBR) e acetato de polivinila (PVA) podem ser usados para produzir concreto CAA modificado com polímero. Além disso, o concreto autoadensável de polímero tem boas propriedades mecânicas, especialmente resistência à tração. Negativamente o uso de polímero diminui o grau de hidratação do cimento. Assim, conclui que o CAA modificado por polímero pode ser usado com sucesso na

reparação de elementos de concreto ou na construção de novos elementos de concreto, especialmente quando o concreto é submetido a condições severas.

A utilização de resíduo eletrônico ou lixo eletrônico de natureza polimérica em substituição ao agregado graúdo no concreto convencional tem sido alvo de pesquisa. Manjunath (2015) estuda a utilização de partículas de resíduo eletrônico como agregado fino e graúdo no concreto. Foi realizado um estudo experimental utilizando porcentagem de substituição entre 0% a 30% (em intervalos de 10%). A resistência à compressão, tração e flexão do concreto com mostraram melhores resultados quando comparados ao concreto referência sem resíduo eletrônico. Dawande et al. (2016) estudam o uso de resíduo eletrônico como substituição do agregado graúdo em concreto. Foi encontrado que o uso de agregado resíduo eletrônico resultado na produção de concreto leve. Nesse estudo o agregado graúdo foi parcialmente substituído por resíduo eletrônico até 25% com cinzas volantes substituindo o cimento em 40% as propriedades de trabalhabilidade, resistência à compressão e flexão foram avaliadas. Donadkar et al. (2016) apresentam uma visão geral do uso de resíduo eletrônico como placa de circuito impresso no concreto. E mostra que o resíduo eletrônico pode ser um substituto do agregado fino em concretos. Concluir que o uso deste tipo de agregado tende a diminuir a demanda por agregado natural no concreto e destaca que é de grande importância estudos que explorem a substituição dos agregados naturais do concreto. Devi et al. (2017) realizam a utilização de resíduo eletrônico provenientes de computadores, TV's, refrigeradores e rádios obsoletos e fora de uso. O resíduo eletrônico foi utilizado em substituição parcial do agregado graúdo do concreto, variando de 0% a 20%. Foi encontrado que o uso de resíduo eletrônico como agregado graúdo proporciona ganho de resistência ao concreto. Raut et al. (2018) estudam propriedades físicas e mecânicas, trabalhabilidade, resistência à compressão e flexão do concreto com e sem resíduo eletrônico. Faz uso de um traço referência sem resíduo eletrônico e traços com substituições de resíduo eletrônico pelo agregado graúdo nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15%. Rathore e Rawat (2019) investigam a substituição parcial do agregado graúdo por resíduo eletrônico no concreto convencional. Utiliza partículas com dimensões variando de 10 mm a 20 mm e substituições de 5% a 30% fazendo adições de 5% em 5%. Foi encontrado para ensaios de resistência à compressão e tração aos 7, 14 e 28 dias de cura, aumento de resistências até substituições de 15%. E os resultados são melhores nos concreto com 15% de substituição de resíduo eletrônico, em que a resistência é 20% maior comparado ao concreto referência sem resíduo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa experimental deste trabalho pode ser resumida em três partes gerais: seleção e caracterização dos agregados que compõe o traço, desenvolvimento do traço referência CAA e execução dos ensaios no estado fresco e endurecido. Um fluxograma do desenvolvimento desta etapa experimental é mostrado na Figura 24 em que é detalhada a sequência das atividades para se chegar ao CAA e mostrado a sequência de obtenção do resíduo polimérico da indústria até utilização no CAA, respectivamente.

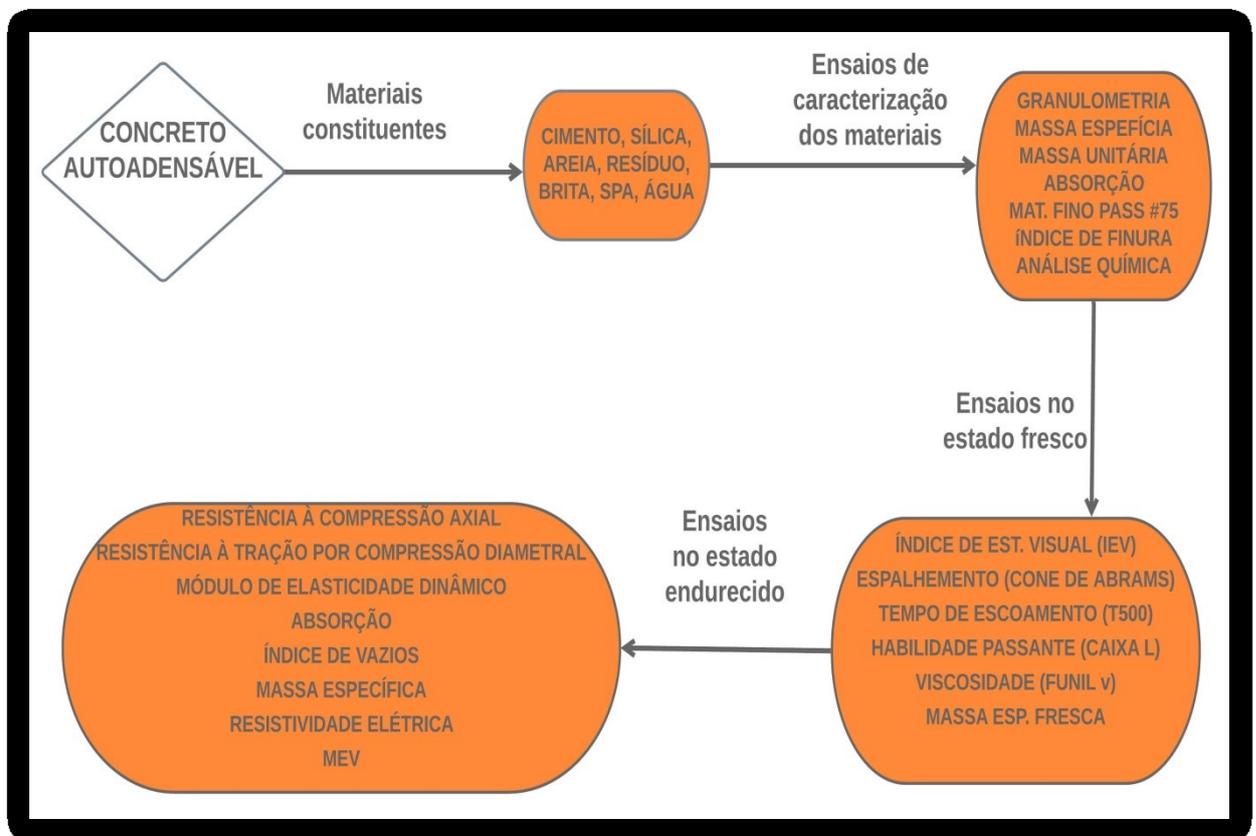


Figura 24: Fluxograma do procedimento experimental para obtenção do CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

3.1. Materiais

Os materiais para a produção dos concretos autoadensáveis com substituição de RP por brita foram:

- Cimento Portland CPV;
- Sílica ativa (SA);

- Areia natural quartzosa;
- Brita zero ou pedrisco basáltico;
- Aditivo superplastificante (SPA);
- Resíduo polimérico (RP) (originado na reciclagem de refrigeradores).

A Tabela 9 mostra os ensaios executados para a caracterização dos agregados e as normas que foram utilizadas para a realização dos ensaios. Esses resultados são discutidos no Capítulo de resultados e discussões (capítulo 4).

Tabela 9: Ensaios executados na caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Material	Ensaio	Norma ABNT
Agregado miúdo - Areia média	Granulometria	ABNT NBR 248:2003
	Massa específica	ABNT NBR 52:2009
	Massa unitária	ABNT NBR 45:2006
Resíduo polimérico (RP)	Granulometria	ABNT NBR 248:2003
	Massa específica	ABNT NBR 52:2009
	Massa unitária	ABNT NBR 45:2006
	Classificação - Resíduos sólidos	ABNT NBR 10004:2004
	Espectroscopia no infravermelho	ASTM D 2621, D 2702, D 3677, E 1252
Agregado graúdo - Brita zero	Granulometria	ABNT NBR 248:2003
	Massa específica	ABNT NBR 53:2009
	Massa unitária	ABNT NBR 45:2006

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Também como forma de caracterização do resíduo polimérico, este foi separado e quantificado em porcentagens das partículas constituintes. Os dados referentes ao cimento portland, sílica ativa e aditivo superplastificante foram obtidos dos seus respectivos fabricantes.

Água de amassamento: Foi utilizado na pesquisa água potável proveniente da rede pública de abastecimento do município de Itajubá-MG.

Cimento Portland: O cimento empregado foi da empresa Votorantim Cimentos do tipo alta resistência inicial (CPV). As propriedades e características do cimento utilizado neste trabalho são mostradas na Tabela 10 que foram fornecidas pela empresa.

Tabela 10: Propriedades e características físicas do CPV - ARI.

Norma ABNT NBR	Valor	Unidade
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)	3,09	Kg/dm ³
Massa unitária no estado solto (ABNT NBR 45:2006)	1,04	Kg/dm ³
Tempo de pega (ABNT NBR 65:2003)	Início	140 min
	Fim	205 min
Resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997)	1 dia	28,0 MPa
	3 dias	41,0 MPa
	7 dias	47,5 MPa
	28 dias	56,0 MPa

Fonte: Adaptado de VOTORANTIMCIMENTOS, 2017.

Os valores encontrados para massa específica, massa unitária no estado solto, tempo de pega e resistência a compressão se encontram dentro das faixas aceitáveis para o concreto do tipo CPV ARI em suas respectivas normas como mostra a Tabela 10.

A areia empregada é proveniente do município de Itajubá-MG seu nome comercial é do tipo areia média.

A brita empregada é proveniente do município de Itajubá-MG seu nome comercial é brita zero ou pedrisco.

O aditivo superplastificante (SPA) utilizado nos traços foi o SILICON AD 50404, fornecido e fabricado pela empresa Tecnosil. De acordo com a empresa o SILICON AD é um aditivo orgânico à base de policarboxilatos de última geração, proporcionando elevado poder de dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água e ganho de resistência mecânica (Grupo Tecnosil, 2018). Pode ser utilizado para as seguintes aplicações: concretos autoadensável (CAA), concretos para pisos, concretos usinados convencionais e bombeados, concreto para pavimentos rígidos de rodovia, concreto de alto desempenho (CAD) (Grupo Tecnosil, 2018).

A Tabela 11 mostra os resultados referentes às propriedades do aditivo superplastificante (SPA).

Tabela 11: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante SILICON AD 50404

Propriedades físicas e químicas	Valores
pH	3,5 a 5,5
Aspecto físico	Líquido
Forma	Líquida
Cor	Mel e castanho
Odor	Característico
Densidade relativa - g/cm ³	1,06 à 1,10
Solubilidade	Soluvel e água
Dosagem	De 0,2 a 2,0 % no peso de cimento

Fonte: Grupo Tecnosil, 2018.

Com base na Tabela 11 é possível constatar que o SPA possui pH levemente ácido 3,5 a 5,5; cor castanho e mel; odor característico; densidade relativa a água de 1,06 a 1,10 g/cm³; possui solubilidade em água é recomendado dissolver de 0,2% a 2,0% em solução por massa do cimento.

Sílica ativa: A sílica ativa ou microsílca (nome comercial) utilizada como agregado nesta pesquisa foi fornecida pela empresa TECNOCIL. A Sílica Ativa é um pó fino pulverizado decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. Portanto é um produto de origem metalúrgica, o que lhe confere maior estabilidade quanto a sua composição química e física. O alto teor de SiO₂ no formato amorfo (não cristalino), aliado a uma elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, conferindo melhor desempenho em concretos e argamassa. No processo de fabricação do silício metálico, é gerado um gás (SiO) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica ativa amorfa, não cristalina (SiO₂). As partículas de Sílica Ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1 µm e área superficial específica entre 15 e 25 m²/kg, apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparentemente baixa (Grupo Tecnosil, 2018).

A Tabela 12 mostra os resultados referentes às propriedades da sílica ativa.

Tabela 12: Características físicas e químicas da sílica ativa

Características Físicas e químicas	
Massa Específica - kg/m ³	2.220
Teor de SiO ₂ - %	> 90
Superfície Específica - m ² /kg	~ 19.000
Formato da partícula	Esférico
Massa unitária	

Não Densificado - kg/m ³	< 350
Densificado - kg/m ³	> 350

Fonte: Grupo Tecnosil, 2018.

Com base na Tabela 12 é possível concluir que a sílica ativa possui massa específica ou densidade acima de 2200 kg/m³; teor de óxido de sílica (SiO₂) acima de 90%, isso mostra o grau de pureza da sílica; superfície específica de aproximadamente 19.000 m²/kg se comparada a superfície específica da cinza volante de 300 a 700 m²/kg e escória de alto-forno 300 a 700 m²/kg a sílica ativa possui grau de finura elevado. Somente a cinza de casca de arroz possui superfície específica acima desse valor variando de 50000 a 10000 m²/kg (BORJA, 2011).

3.1.1. Resíduo polimérico (RP) de refrigerador

O RP obtido da empresa FOX, provem de refrigeradores inutilizáveis ou descartados. Ele foi recebido na forma de partículas pontiagudas, irregulares como pode ser observado na Figura 25. O processo de geração deste resíduo passa por coleta e limpeza superficial dos refrigeradores, seguido de retirada dos gases poluidores atmosféricos (geralmente o gás freon 12) e partes metálicas (compressor, válvula de expansão, evaporador, condensador) (INDUSTRIAFOX, 2010). Após esta etapa, o material restante é triturado, separado e armazenado, ver detalhes no tópico 2.2.6 – Fases da reciclagem dos refrigeradores na indústria FOX.



Figura 25: Pesagem da amostra (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

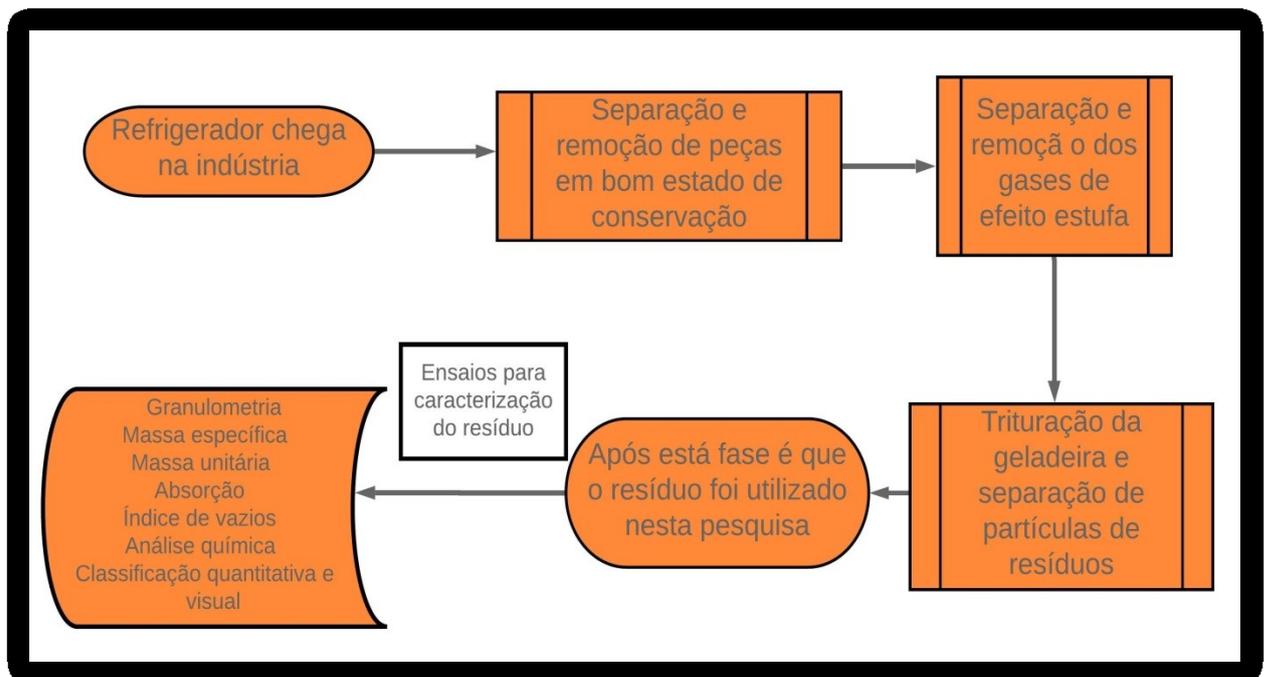


Figura 26: Sequência de obtenção do resíduo polimérico da indústria Fox até utilização no CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Para esta pesquisa, o RP foi coletado na forma final de armazenamento da empresa FOX, apresentando-se bastante heterogêneo. No laboratório, este material foi disposto em recipientes como mostra a Figura 27, em que posteriormente foi peneirado em malha de 4,8 mm. A parte retida e acumulada nesta peneira foi utilizada para execução dos traços em substituição ao agregado graúdo do concreto (brita zero), uma vez que ambas possuem

granulometria semelhante. Nota que o RP possui coloração diversificada, pois, provem de partes diferentes dos refrigeradores que por sua vez são de marcas e modelos diferentes.



Figura 27: Resíduo polimérico oriundo da reciclagem de refrigeradores separados segundo granulometria graúda e miúda (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2019).

3.2. Método de dosagem e produção dos traços

Neste trabalho para se chegar ao traço de referência de CAA adequado e executar as adições de resíduo polimérico (RP), tomou-se como base o método de dosagem proposto por Tutikian (2004), o qual se baseia no método para concreto convencional Helene e Terzian (1992) que é um método prático e experimental. Algumas recomendações ou diretrizes encontradas na literatura e que serviram de norteamento para execução dos traços foram:

- Resistência mecânica à compressão acima de 20 MPa, aos 28 dias de idade ABNT NBR 8953:2015;
- Índice de consistência ou espalhamento variando de 750 mm a 860 mm com base na ABNT NBR 15823-2:2017;
- Valor de viscosidade plástica aparente T500 (sob fluxo livre) menor ou igual a 2 segundos ABNT NBR 15823-2:2017;
- Habilidade passante pela caixa L (sob fluxo livre) maior de 80, com três barras de aço ABNT NBR 15823-3:2017;

- Viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) menor que 2 segundos ABNT NBR 15823-5:2017;
- Adição mineral de finos (sílica ativa) de aproximadamente 10% em relação à quantidade de cimento (BOGAS et al. 2012; HUBERTOVIÁ et al. 2013);
- Teor de argamassa em torno de 65% e consumo de cimento, próximo de 500 kg/m³. Tendo em vista que o resíduo a ser adicionado possui massa específica baixa (1,33 g/cm³) e baixa resistência mecânica, por ser um polímero, alguns autores como Utama et al (2012), Rossignolo (2009), e Jalal et al. (2012) fazem essas recomendações. Pois, ao contrario do concreto convencional (CCV), neste caso a argamassa se torna a fase mais resistente e os agregados a fase mais frágil;
- A adição de superplastificante de 3^o geração, a base policarboxilatos, com objetivo de reduzir a água de amassamento e obter fluidez. Com base em trabalhos como Angelin (2018) e Borja (2011), procure-se fixar a adição de SPA em torno de 1,0% a 1,5% da massa de cimento;
- Os agregados graúdos devem possuir granulometria variando de 4,8 mm a 12,5 mm em sua maior parte e dimensão máxima de 20 mm (EFNARC, 2005);
- As substituições dos finos pozolânicos devem ser feitas no lugar do cimento, e os finos não pozolânicos no lugar da areia (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2006);
- Relação a/c variando na faixa de 0,26 a 0,48. Sabendo que 80% dos casos a relação a/c ideal se encontra na faixa de 0,28 a 0,42 (DOMONE, 2006);

As etapas experimentais se dividem em duas partes, sendo a primeira consistindo na determinação do traço com melhores propriedades reológicas no estado fresco. Com fatores como abatimento, relação a/c e teor de argamassa que estão dentro das recomendações citadas anteriormente. Na determinação do teor de argamassa e determinação dos traços rico, intermediário e pobre, o concreto ainda é CCV. Somente nas etapas de adição de SPA e acerto dos finos que o concreto se transforma em CAA. O APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DE CAA, fornece informações sobre a determinação do teor de argamassa e determinação dos traços.

A segunda etapa se resume na substituição do RP em diferentes porcentagens por brita, tendo como base o traço de referência com zero por cento de substituição de RP por brita. Um resumo destas duas etapas é mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Etapas para produção do CAA sem e com resíduo polimérico.

Primeira etapa:	
a.	Escolha dos materiais
b.	Determinação do teor de argamassa
c.	Determinação dos traços: rico, intermediário e pobre
d.	Colocação do aditivo superplastificante
e.	Acerto dos finos
f.	Ensaio de trabalhabilidade até concreto convencional (CCV) virar concreto autoadensável (CAA)
Segunda etapa:	
Incorporação de RP no traço de referência (0% de RP) em substituição a brita, de 5% em 5%, até o CAA perder suas características de trabalhabilidade no estado fresco.	

Fonte: Adaptado TUTIKIAN, 2008.

Na Tabela 14 exibe os traços utilizados para a pesquisa, como produto final das etapas anteriormente mencionadas. Os traços são em massa e as substituições de RP por brita também são realizados em massa.

Tabela 14: Traços unitários em massa utilizados no CAA e consumo de cimento.

Traços	Porcentagem (%) de RP substituído por brita	Cimento	Sílica	Areia	RP	Brita	SPA	a/c	Consumo de cimento (Kg/m ³)
CAA R	0%	1,0	0,1	1,6	0,00	1,40	1,5%	0,45	509,4
CAA 5	5%	1,0	0,1	1,6	0,07	1,33	1,5%	0,45	499,
CAA 10	10%	1,0	0,1	1,6	0,14	1,26	1,5%	0,45	475,7
CAA 15	15%	1,0	0,1	1,6	0,21	1,19	1,5%	0,45	475,2
CAA 20	20%	1,0	0,1	1,6	0,28	1,12	1,5%	0,45	474,6

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Na execução dos traços deste trabalho foi utilizada betoneira da marca CSM 145 litros, modelo CS 145 com rotação em eixo inclinado. Para tanto, os agregados foram colocados no interior da betoneira para mistura em duas etapas. Sendo a primeira: cimento, sílica ativa, areia, SPA e metade da água de amassamento. E a segunda: brita, RP e restante da água de amassamento. Procurou se adicionar primeiro os agregados finos para melhor homogeneização de todo conjunto de agregados. A Tabela 15 mostra a ordem de colocação dos agregados e o tempo gasto aproximadamente em cada etapa.

Tabela 15: Ordem de colocação dos agregados e o tempo gasto em cada etapa da produção de CAA

Ordem de mistura dos agregados	Agregado
Primeiro	Cimento, sílica ativa, areia, SPA e metade da água de amassamento.
Segundo	Brita, RP e restante da água de amassamento.

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Para execução dos traços, primeiro foram adicionados os agregados com granulometria fina, (cimento, finos e agregado miúdo), metade da água de amassamento e SPA, que foram colocados na betoneira e misturados por cerca de 10 minutos até sua correta homogeneização. Num segundo momento, foram adicionados os agregados com granulometria graúda, brita e o resíduo, juntamente com o restante da água de amassamento que também foram misturados por tempo aproximado de 10 minutos até atingir nível visual de homogeneização adequada.

A Figura 28 mostra os agregados separados antes de iniciar a execução do traço.



Figura 28: Materiais separados para produção do CAA com 10% substituição de brita por resíduo polimérico em massa (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A Figura 29 mostra alguns corpos de provas de CAA do traço referência, moldados após a execução dos ensaios no estado fresco. Os mesmos então submersos em água potável para a execução correta da cura.



Figura 29: Corpos de prova 10 x20 mm de CAA desmoldados submersos em processo de cura (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Na Tabela 16 pode se encontrar o número de corpos de prova moldados para cada ensaio realizado no estado endurecido.

Tabela 16: Número de corpos de prova por ensaio no estado endurecido e suas respectivas normas

Ensaio	Quantidade de CPs de CAA
Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2018)	7 dias - 4 CPs 14 dias - 4 CPs 28 dias - 4 CPs 91 dias - 3 CPs
Resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011)	28 dias - 4 CPs
Módulo de elasticidade dinâmico – Não Destrutivo (ASTM E1876:2015)	28 dias - 3 CPs
Absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT NBR 9778:2009)	28 dias - 3 CPs
Determinação da resistividade elétrica (ABNT NBR 9204:2012)	28 dias - 3 CPs

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Amostras ou fragmentos do CAA endurecido foram utilizados para as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os traços com e sem resíduos.

3.3. Ensaio do CAA estado fresco e endurecido

Para averiguar as principais características do CAA produzido nesta pesquisa, foram utilizados ensaios padronizados que são nomeados nesta sessão.

3.3.1. Ensaios no estado fresco

Os ensaios utilizados para o estado fresco do concreto autoadensável são de uso exclusivo para o mesmo, não se aplicando, portanto, em concretos convencionais. Para tanto, os ensaios utilizados foram: Índice de estabilidade visual (IEV), Método do cone de Abrams, Método da caixa L (H2/H1), Método do funil V, Método gravimétrico. Na Tabela 17, são mostrados esses ensaios com suas respectivas normas da ABNT.

Tabela 17: Ensaios, normas e propriedade utilizadas no estado fresco do concreto

Experimento	Norma	Aspecto e qualidade passíveis de serem analisadas
Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual.	Método do cone de Abrams (ABNT NBR 15823-2:2017)	Capacidade de vazão, fluidez, resistência à segregação e à exsudação.
Determinação da viscosidade.	Método do funil V (ABNT NBR 15823-5:2017)	Viscosidade e fluidez.
Determinação da habilidade passante.	Método da caixa L (ABNT NBR 15823-4:2017)	Fluidez, coesão, Habilidade passante.
Determinação da massa específica, rendimento e teor de ar.	Método gravimétrico (ABNT NBR 9833:2009)	Massa específica, consumo e teor de ar.

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

3.3.2. Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido o CAA é caracterizado pelas mesmas normas exigidas para concreto convencional. Os ensaios executados foram: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios, massa específica, módulo de elasticidade dinâmico, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e resistividade elétrica. Na Tabela 18 são mostrados esses ensaios com suas respectivas normas ABNT.

Tabela 18: Ensaios, normas e propriedades utilizadas no estado endurecido do concreto.

Ensaio	Norma	Aspecto a ser analisado
Resistência à compressão axial	(ABNT NBR 5739:2007)	Resistência mecânica à compressão
Resistência à tração por compressão diametral	(ABNT NBR 7222:2011)	Resistência mecânica à tração
Módulo de elasticidade dinâmico não-destrutivo pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI)	(ASTM E1876)	Módulo de elasticidade do concreto, por meio de excitações por empulso, método não-destrutivo
Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	(ABNT NBR 9778:2005)	Absorção de água, índice de vazios e massa específica
Análise microscópica de amostras de concreto de cada traço, por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	-	Microestrutura: estruturas superficiais de amostras, avaliar a morfologia dos materiais, interfaces, trincas e fissuras, superfícies irregulares, porosidade e possível identificação de elementos químicos.
Ensaio de resistividade elétrica	(ABNT NBR 9204:2013)	Determinação da resistividade elétrica-volumétrica do concreto endurecido

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

3.3.3. Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal para ensaios mecânicos, marca TIME *testing machines* (máquina de testes universal elétrica e hidráulica, servo controlada por computador), modelo WAW-1000C, e capacidade de carga 1000 t sendo calibrada na data 15/02/2018. Foram produzidos 4 corpos de provas para cada traço e idade dos CAA que foram ensaiados aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura (exceto para os 91 dias de cura que foram produzidos 3 corpos de provas).

3.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal para ensaios mecânicos, marca TIME *testing machines* (máquina de testes universal elétrica e hidráulica, servo controlada por computador), modelo WAW-1000C, e capacidade de carga 1000 t sendo calibrada na data 15/02/2018. Foram produzidos 4 corpos de provas para cada traço dos CAA que foram ensaiados aos 28 dias de cura.

3.3.5. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). As medidas da massa foram realizadas na balança SHIMADZU, modelo UX6200H com precisão de 0,01 g. Foram produzidos 3 corpos de provas para cada traço dos CAA que foram ensaiados aos 28 dias. A Figura 30 mostra a realização do ensaio.



Figura 30: Ensaio de massa específica em corpo de prova de concreto (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

3.3.6. Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Para a aplicação da Técnica de Excitação por Impulso, foi empregado o equipamento Sonelastic na seguinte configuração: Software Sonelastic versão 3.0, suporte ajustável para barras e cilindros SA-BC, captador acústico direcional CA-DP e pulsador manual, o conjunto é mostrado na Figura 31. Foram produzidos três corpos de provas para cada traço dos CAA que foram ensaiados aos 28 dias de cura. A Figura 31 mostra o ensaio de um corpo de prova.



Figura 31: Configuração básica do software Sonelastic para a caracterização dos corpos de prova e suporte para realização do ensaio (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Por meio do módulo de elasticidade dinâmico obtido pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI) e com base na ASTM E1876 foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico para os concretos. Para tanto foi feito uso do método proposto por (POPOVICS, 2008). É possível fazer uma estimativa do módulo de elasticidade estático (E_c) a partir do dinâmico (E_d), utilizando o modelo proposto por Popovics (POPOVICS, 2008). Visto que o mesmo foi testado e apresentou bons resultados para concretos de baixa e média densidade a diferentes idades (entre um dia e um ano), assim como diferentes classes de resistência à compressão (entre 5,4 MPa e 82,7 MPa) (POPOVICS, J. S. 2008). O modelo proposto por Popovics (2008) faz uso da Equação 2 em que é utilizada para cálculo do módulo de elasticidade estático pelo módulo de elasticidade dinâmico.

Sendo:

$$E_c = k \cdot E_d^{1,4} \cdot \rho^{-1} \quad (2)$$

Em que k é uma constante que depende das unidades utilizadas ($k = 0,107$ quando o módulo é dado em Pa e a densidade em kg/m^3) e ρ é a densidade do concreto.

3.3.6.1. Módulo de elasticidade estático pela resistência à compressão

Também foi obtido o módulo de elasticidade estático por meio da ABNT NBR 6118:2014 que faz uso da resistência à compressão axial do concreto. E um meio prático de se obter o módulo de elasticidade estático é a partir da resistência à compressão. Esse módulo de elasticidade estático é utilizado em projetos estruturais (ABNT NBR 6118:2014). E são muitas as situações que o fornecedor de concreto se vê obrigado a produzir concreto com resistência superior ao especificado em norma. As incertezas levadas em consideração para estimativa deste módulo fazem com que os concretos sejam produzidos com resistência acima do especificado, tornando o produto final mais caro para o consumidor (BORIN, BAUER e FIGUEIREDO, 2012; DE MARCHI, 2011).

Existem várias normas que podem ser utilizadas para transformar a resistência à compressão em módulo de elasticidade estático, por exemplo:

- ABNT NBR 6118: 2014 – Projeto de estrutura de concreto, procedimentos;
- *Federation internationale du beton - Model Code for Concrete Structures 2010*;
- *American Concrete Institute – 318: Building code requirements for structural concrete (ACI 318)*;
- *European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of Concrete Structures (EUROCODE 2)*.

Para o concreto desta pesquisa foi calculado o módulo de elasticidade estático pela ABNT NBR 6118:2014. As Equações 3 e 4 são recomendadas para fazer esse cálculo. É indicado usar a Equação 3 para concretos com $20 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ e Equação 4 para concretos com $55 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$. Neste trabalho foi utilizada a Equação 3, pois, os valores de resistência à compressão se encontram aproximadamente nesta faixa de resistência.

$$E_{ci} = \alpha e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha e \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Sendo (αe) uma constante sem dimensão que varia com o tipo de agregado na confecção do concreto, esses valores estão na Tabela 19. E_{ci} faz referência ao módulo de

elasticidade estático tangente inicial aos 28 dias, e f_{ck} representa a resistência à compressão do concreto dado em Pascal (Pa) aos 28 dias.

Tabela 19: Variação do valor de αe com o tipo de agregado na fabricação dos concretos

Agregado	αe
Basalto e calcário denso	1,2
Quartzo	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: OTANI e PEREIRA, 2017.

3.3.7. Resistividade elétrica do concreto

Os ensaios foram realizados no Laboratório no Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE) da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI de acordo com a Norma ABNT NBR 9204:2012. Na Figura 32 é mostrado a execução do ensaio em um corpo de prova.

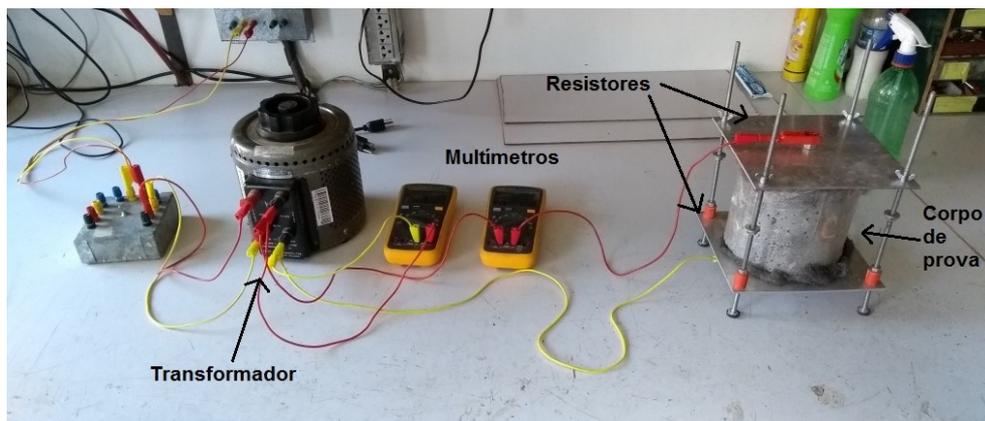


Figura 32: Ensaio de resistividade elétrica em corpo de prova de CAA (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

3.3.8. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Essa análise serviu de auxílio para averiguar a zona de transição na interface (ZTI) compreendida entre agregado e pasta de cimento, análise da propagação de fissuras e vazios existentes, análise da topografia das fases agregado e pasta de cimento. Foram utilizados em todas as micrografias, elétrons secundários (ES) de baixa energia que permitem dentro da escala e aumento utilizado, analisar a topografia das amostras de concreto. O ensaio foi realizado no campus da UNIFEI, Laboratório de Física-Química. Foi utilizado microscópio mostrado na Figura 33, marca Zeiss, modelo EVO MA15, com calibração de 01/02/2019.

As amostras de concreto separadas para ensaio são classificadas como sólidas particuladas de compósito. Possuem dimensões de poucos centímetros, aproximadamente pequenos cubos de 1,0 cm de dimensões que representam a totalidade do material. Para as amostras serem analisadas, elas foram preparadas manualmente, com corte, lixamento e polimento. Por fim, como se trata de um material isolante elétrico, as amostras foram recoberta por uma fina camada de material condutor, neste caso utilizou-se ouro.

Na Figura 33 é mostrado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) que foi utilizado para análise das amostras. É apresentado no detalhe, o detector de elétrons secundários (EDS) (1), a câmara a vácuo (2) e o porta amostras (3).



Figura 33: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado para análise das amostra - marca Zeiss, modelo EVO MA15, Lab. de Física-Química UNIFEI/Itajubá (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor exposição dos resultados, a apresentação é feita em três etapas: caracterização dos agregados, ensaios no estado fresco e no estado endurecido do concreto. A análise realizada neste trabalho é do tipo quantitativa, com avaliação dos dados numéricos, a fim de compreender seus comportamentos e eventuais tendências.

4.1. Resultado da caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados foi realizada por meio de ensaios que seguiram as recomendações das suas respectivas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.1.1. Agregado miúdo

Na Tabela 20 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e granulométrica realizados na areia utilizada nesta pesquisa. Na Figura 34 é apresentada a curva granulométrica deste agregado. Os ensaios empregados para caracterização deste agregado foram massa específica segundo a ABNT NBR NM 52:2009; massa unitária e volume de vazios segundo a ABNT NBR NM 45:2006; absorção de água segundo a ABNT NBR NM 30:2001; composição granulométrica conforme a ABNT NBR NM 248: 2003; material passante na peneira 75 μ m de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003 e por fim determinação de impurezas orgânicas pela ABNT NBR NM 49:2001.

Tabela 20: Características físicas e granulométricas da areia

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	%retida	%acumulada
4,80	0,2	0
2,40	0,9	1
1,20	5,6	7
0,60	7,0	14
0,30	43,8	58
0,15	38,8	96
< 0,15	3,7	100
D _{máx} característico (mm)	2,4	
Módulo de finura	2,76	
Classificação	Zona utilizável inferior	
Massa específica (g/cm ³)	2,67	
Massa unitária (g/cm ³)	1,69	
Absorção de água (%)	0,19	
Material fino (passante 75µm) (%)	1,95	
Impurezas orgânicas	Inexistente	

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

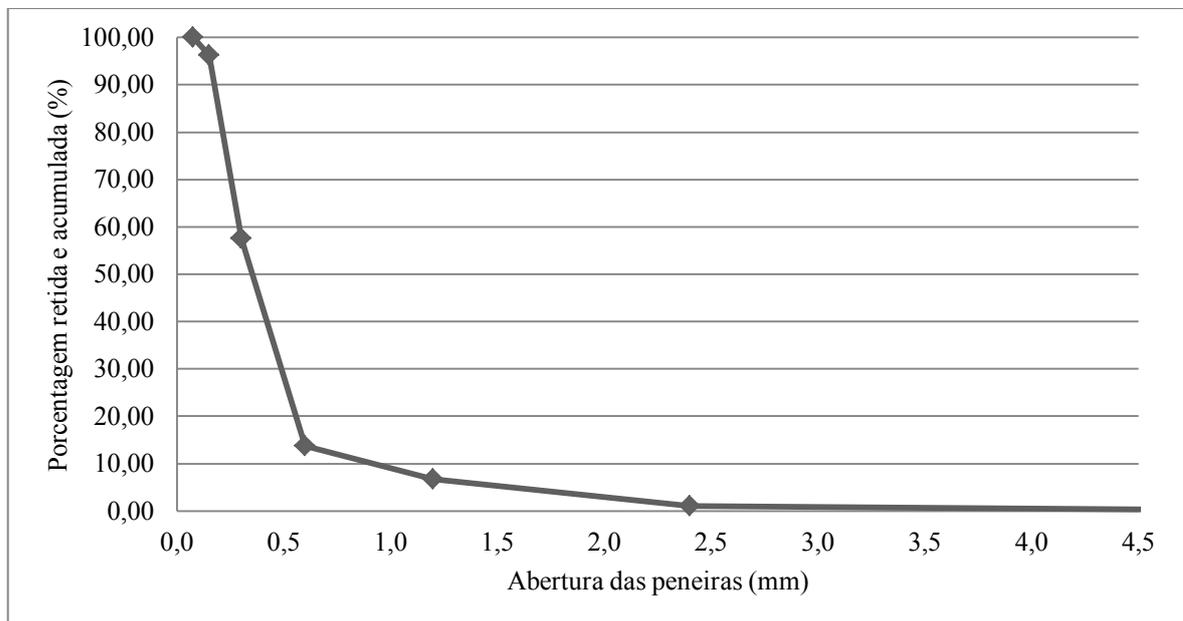


Figura 34: Curva granulométrica da areia (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A partir da granulometria apresentada na Tabela 20 e Figura 34 é possível classificar a areia fina, com módulo de finura (MD) de 1,76 e pertencente à zona utilizável segundo a ABNT NBR 7211:2019.

4.1.2. Agregado graúdo

Na Tabela 21 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e granulométrica realizados na brita utilizada nesta pesquisa e na Figura 35 é apresentada a curva granulométrica deste agregado. Os ensaios empregados para caracterização deste agregado foram determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água segundo a ABNT NBR NM 52:2009; massa unitária e volume de vazios segundo a ABNT NBR NM 45:2006; composição granulométrica conforme a ABNT NBR NM 248:2003; material passante na peneira 75 μ m de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003.

Tabela 21: Características físicas e granulométricas da brita.

Agregado graúdo: caracterização física e granulométrica		
Abertura da peneira (mm)	Brita	
	% retida	% acumulada
19,00	0,0	0
9,50	4,1	4
4,80	31,1	71
2,40	12,5	83
1,20	7,6	91
0,60	4,0	95
0,30	2,1	97
0,15	1,0	98
< 0,15	2,0	100
D _{máx} característico	9,50	
Módulo de finura	6,39	
Classificação	Zona 4,75 / 12,5	
Massa específica (g/cm ³)	2,88	
Massa unitária (g/cm ³)	1,45	
Absorção de água %	1,41	
Material fino (passante 75 μ m) %	2,44	

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

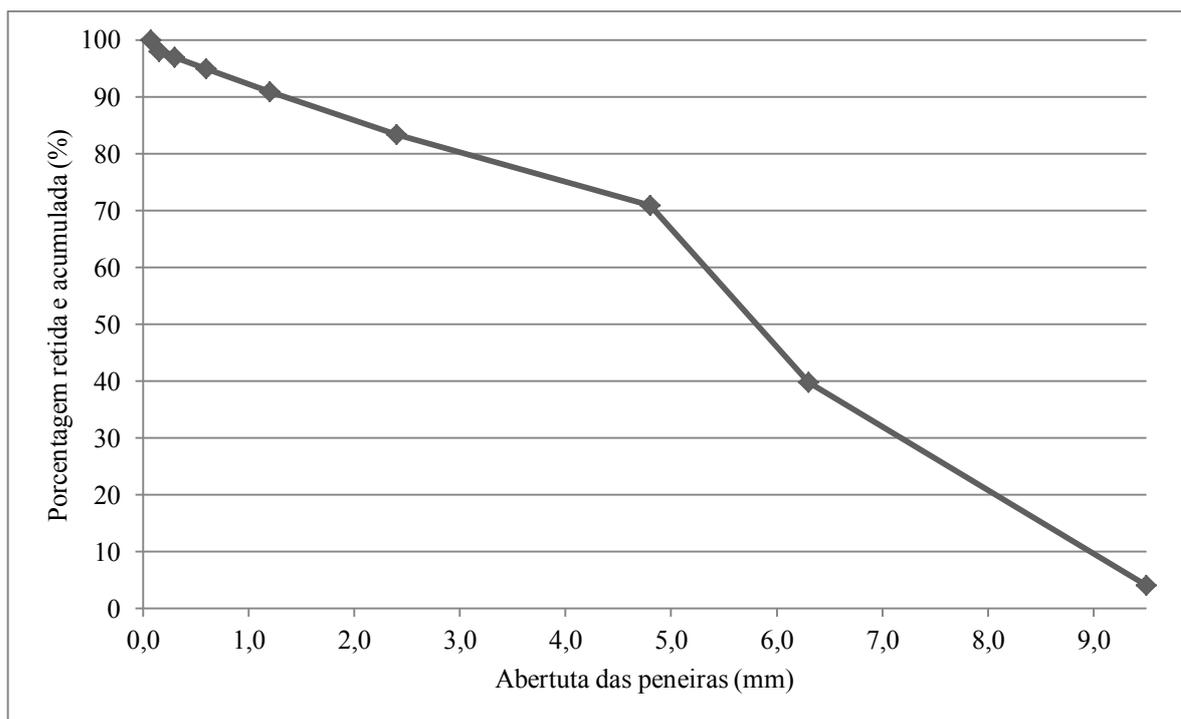


Figura 35: Curva granulométrica da brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A brita em questão possui granulometria aproximadamente contínua, apresentando todas as frações granulométricas na faixa de graduação medida como pode ser observado na Figura 35. A partir da granulometria apresentada Tabela 21 é possível classificar a brita como brita 0 (zero) com diâmetro máximo de 9,5 segundo a ABNT NBR 7211:2019.

4.1.3. Resíduo polimérico (RP) de refrigerador

De acordo a lista de classificação para resíduos da resolução CONAMA (2002), o resíduo do presente trabalho se classifica como classe II ou III, código A007 E A008: resíduos de plásticos polimerizados de processo e resíduos de borracha, respectivamente. É importante destacar que para caracterização do RP não existe normalização específica. Com isso, o RP foi caracterizado fisicamente em sua maior parte, por meio dos ensaios empregados para agregados graúdos. Os quais foram: a sua composição granulométrica ABNT NBR NM 248:2003; massa específica, massa específica aparente e absorção de água, segunda a ABNT NBR NM 52:2009; massa unitária e volume de vazios segundo a ABNT NBR NM 45:2006; material passante na peneira 75 μm de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003. A Figura 36 exibe o RP ordenado segundo sua composição granulométrica para uma quantidade de aproximadamente 500 g. As características físicas e granulométricas do RP são mostradas na Tabela 22, bem como sua distribuição granulométrica exibida na Figura 37.

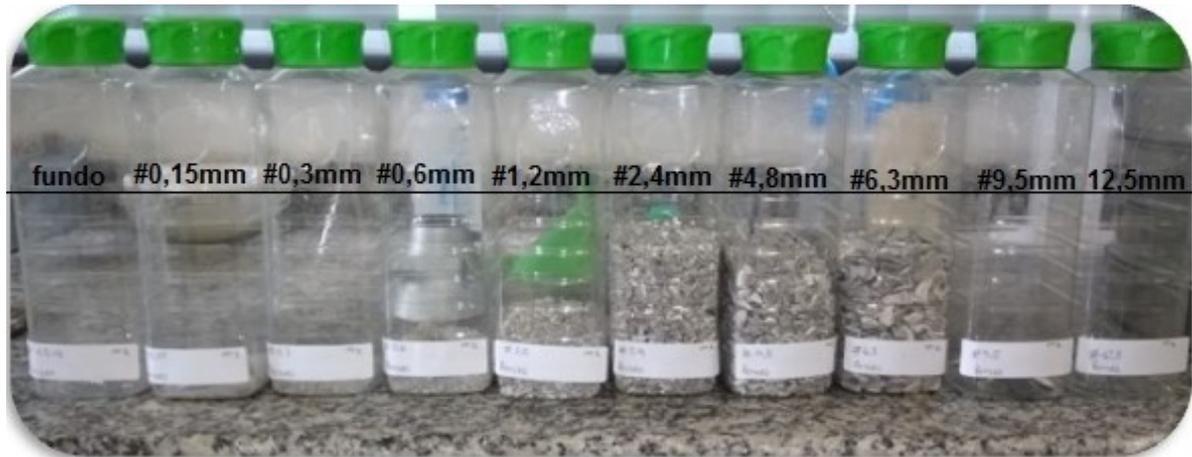


Figura 36: Resíduo polimérico de refrigeradores doados pela Indústria Fox ordenado segundo sua granulometria (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Nota-se na Figura 36 a maior parte dos resíduos poliméricos analisados encontram-se nas faixas entre 2,4 e 6,3 em parte compatível com a brita zero ou pedrisco. Isto justifica a opção de se utilizar o resíduo na substituição da brita zero nos traços de CAA.

Tabela 22: Características físicas e granulométricas do resíduo polimérico

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	% retida	% acumulada
9,50	0,4	0
4,80	28,0	56
2,40	32,0	88
1,20	6,6	95
0,60	3,0	98
0,30	1,3	99
0,15	0,6	100
< 0,15	0,4	100
D _{máx} característico (mm)	9,5	
Módulo de finura	5,37	
Classificação	Classe II ou III / A007 E A008	
Massa específica (g/cm ³)	1,33	
Massa unitária (g/cm ³)	0,585	
Absorção de água %	2,31	
Material fino (passante 75µm) %	4,66	

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

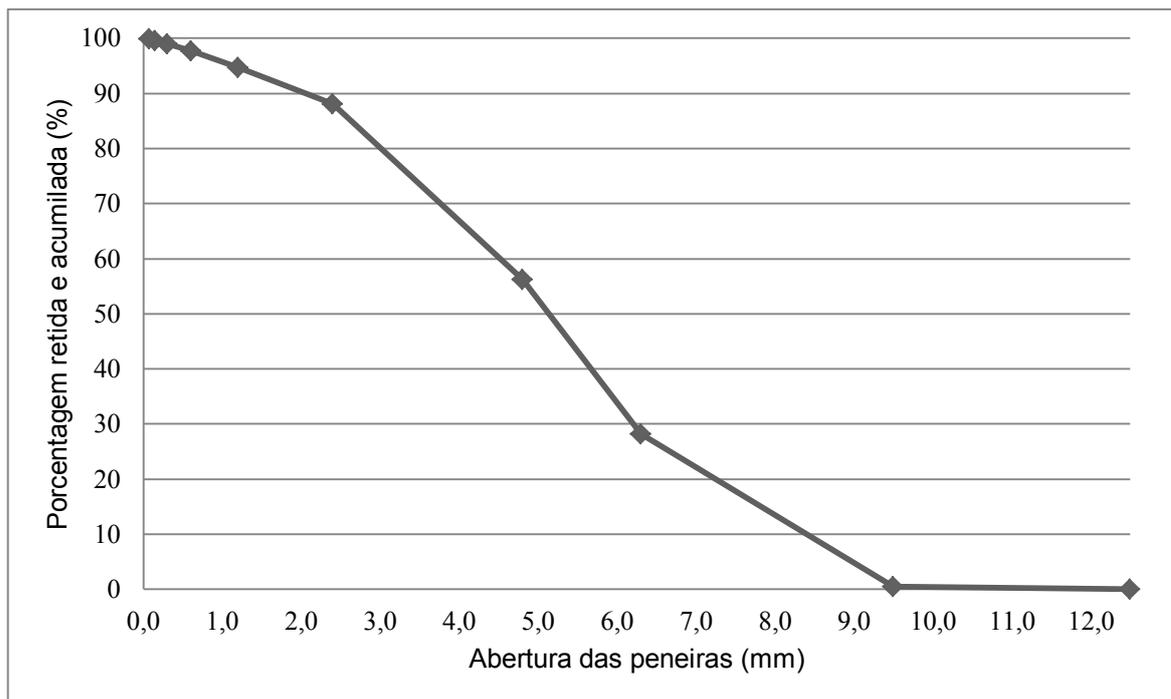


Figura 37: Curva granulométrica do resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

O resíduo polimérico (RP) em questão possui, assim como a brita utilizada, granulometria aproximadamente contínua e bem graduado, apresentando todas as frações granulométricas na faixa de graduação medida, como pode ser observado na Figura 37. A partir da granulometria apresentada na Tabela 22 é possível classificar o RP como pertencente a faixa da brita 0 (zero) com diâmetro máximo de 9,5 mm segundo a ABNT NBR 7211:2019.

Quanto à análise química do RP, foi realizado ensaio de Espectroscopia no Infravermelho (FTIR). A

Tabela 24 mostra o resultado da análise de (FTIR) bem como suas características físicas. E na Figura 38, a amostra é classificada em aspectos visuais que foi realizada para facilitar a realização do ensaio. Essa classificação em aspectos visuais foi necessária, pois, o resíduo em questão é proveniente de diversas partes de refrigeradores. Pois, no processo industrial de montagem, suas peças provem de diferentes componentes que apresentam composições diferentes, devido suas respectivas funções dentro de um refrigerador.



Figura 38: Resíduo polimérico classificado em aspectos visuais (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A Tabela 23 e Figura 39 mostram um levantamento quantitativo em massa realizado num montante de 6,0 kg da amostra de RP, separada em 3 lotes de 2,0 kg, conforme classificada na Figura 38.

Tabela 23: Levantamento quantitativo em massa para amostra de resíduo polimérico

Amostras	Quantidade em massa		
	Lote 1 (kg)	Lote 2 (kg)	Lote 3 (kg)
1	0,62	0,60	0,63
2	0,30	0,29	0,31
3	0,49	0,48	0,48
4	0,47	0,48	0,49
5	0,12	0,15	0,09
Soma	2,00	2,00	2,00

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

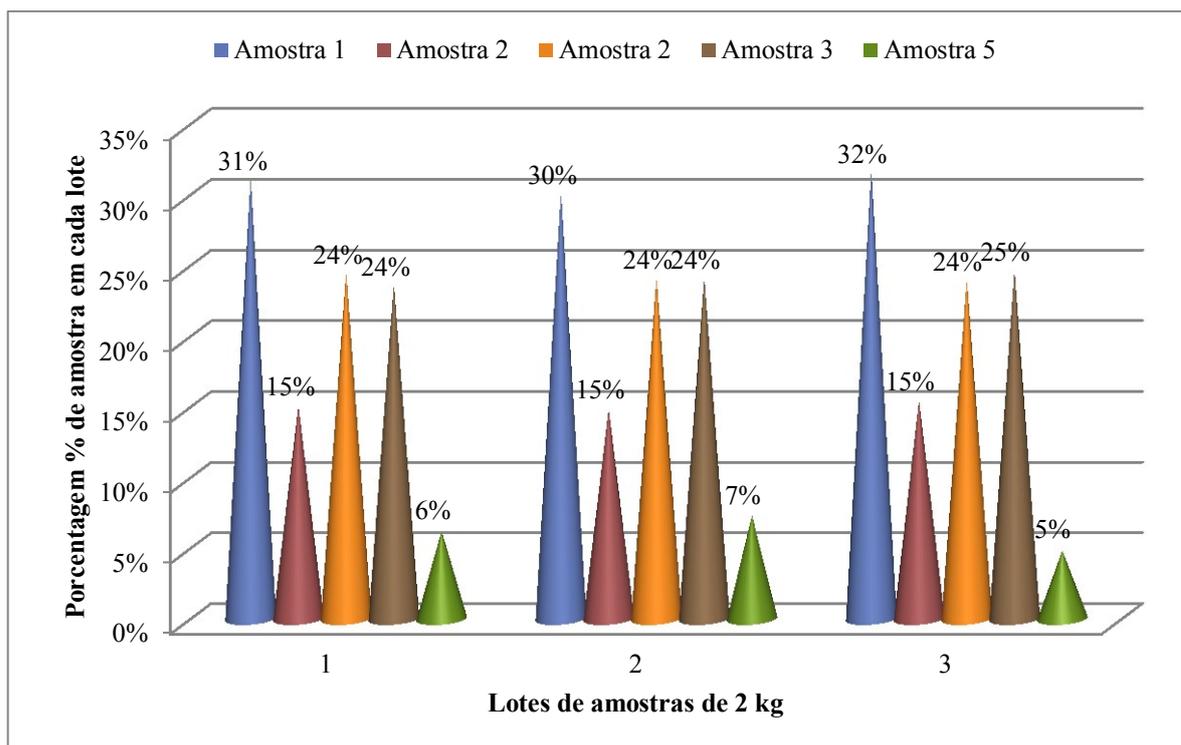


Figura 39: Levantamento em porcentagem para amostra de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Pela Tabela 23 e Figura 39 é possível afirmar que há uma maior quantidade das amostras 1, 4 e 3 respectivamente.

Tabela 24: Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) e aspectos visuais de amostras de resíduo polimérico

Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) e aspectos visuais de amostras		
Amostra	Análise química - Bandas do espectro FTIR	Aspecto físico e visuais
1	Poliuretano aromático	Opaco; branco; superfície lisa; dúctil; rígido
2	Poliuretano aromático	Opaco; cinza forte; superfície rugosa; dúctil; rígido
3	Poliuretano aromático	Opaco; preto; superfície rugosa; dúctil; mole
4	Poliol poliéster alifáticos	Translúcido; cinza forte; superfície lisa; dúctil; rígido
5	Poliol poliéster alifáticos.	Translúcido; cinza claro; superfície lisa; dúctil; rígido
6	Poliuretano aromático	Transparente; superfície lisa; frágil; rígido

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Poliuretano (PU) é um polímero formado por unidades orgânicas e que são unidas por ligações uretânicas. Geralmente é empregado em elastômeros duráveis e em adesivos de alto desempenho, espumas rígidas e flexíveis, em selantes, em fibras, gaxetas, vedações,

preservativos, carpetes, peças de plástico rígido e tintas (GAMA, FERREIRA e TIMMONS, 2018).

O termo Uretano pode referir-se a: Carbamatos, compostos que possuem o grupo funcional $R'O(CO)NHR'$ (onde R' é a designação de um radical livre na extremidade da cadeia carbônica). Os produtos fabricados a partir de poliuretano possuem diversos usos, acima de três quartos do consumo global de poliuretano são na forma de espumas, com os tipos flexível e rígido. As espumas rígidas são alocadas dentro das paredes metálicas ou plásticas da maioria dos refrigeradores e *freezers*, ou ainda atrás de paredes de alvenaria, caso sejam usadas como isolamento térmico e material de enchimento na construção civil. As espumas flexíveis são alocadas dentro dos estofados dos móveis doméstico (AMERICAN-CHEMISTRY, 2020).

Os compostos alifáticos são compostos químicos descritos na química orgânica como constituídos de carbono e hidrogênio e são divididos em duas categoriais: compostos alifáticos que possuem cadeias abertas ou acíclicas (mas esses podem ser cíclicos como o cicliexano) e compostos aromáticos que possuem anéis benzênicos (GAMA, FERREIRA e TIMMONS, 2018).

Os polióis poliésteres são um tipo de pré-polímero de poliuretanos que pode ser encontrado em três formas distintas, PTMEG (politetrametileno glicol), conhecido como polieter premium, PPG (polipropileno glicol) que possui baixo custo, e os poliésteres (GAMA, FERREIRA e TIMMONS, 2018). Esses últimos que se enquadram na categoria do resíduo polimérico desta pesquisa. Contudo, existem outros poliois, como policaprolactona, mas são usadas em menor escala. Com estas três possibilidades de poliois e mais duas possibilidades de isocianatos (PPDI - parafenilenediisocianato, e o NDI - nafítileno diisocianato) existem cinco grandes classes de pré-polímeros de poliuretanos disponíveis (GAMA, FERREIRA e TIMMONS, 2018).

Na Figura 40 é mostrada a equação com a reação para a formação de polióis poliésteres que consiste em uma reação de policondensação de um diácido com excesso de um diol.

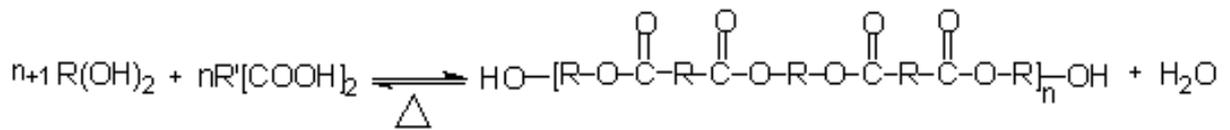


Figura 40: Obtenção de polioli poliéster (Fonte: VILAR, 2004).

Polióis poliésteres a base de ácido adípico (HOOC-(CH₂)₄-COOH) são usados em aplicações nas quais se queira flexibilidade, como nas espumas flexíveis, solados de calçados, elastômeros vazados, elastômero termoplástico (TPU), adesivos e revestimentos macios (VILAR, 2004). A Tabela 14 mostra uma comparação entre o resíduo polimérico e o agregado graúdo (brita) caracterizados nesta pesquisa. É interessante fazer essa comparação, uma vez que o RP irá substituir a brita nos traços de CAA produzidos.

Tabela 25: Comparação entre resíduo polimérico (RP) e brita

Índices	RP	Brita
MF	9,50	5,80
Massa específica	1,33	2,88
Massa unitária	0,59	1,45
Absorção	2,31	1,41

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

A partir dos dados contidos na Tabela 14 é possível verificar que o RP possui módulo de finura maior que o da brita, MF_{RP} = 9,5 contra MF_{brita} = 5,8. A Figura 41 mostra uma comparação visual entre RP e brita, onde fica evidente que o formato diferente entre os dois. A brita tem formato arredondado em comparação com o RP que tem formato de ripas, pontiagudos e irregulares.



Figura 41: comparação visual entre o resíduo polimérico e a brita, utilizados nesta pesquisa como agregado graúdo (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

4.2. Propriedades no estado fresco

A apresentação dos resultados no estado fresco do CAA é realizada nesta etapa. Para tanto, são feitas subdivisões para melhor organização das exposições.

4.2.1. Massa específica, consumo de cimento e teor de ar do concreto no estado fresco

Os resultados para os ensaios de massa específica, consumo de cimento e teor de ar é apresentado na Tabela 26, sendo realizados conforme prescreve a ABNT NBR 9833:2009.

Tabela 26: Resultados do ensaio de massa específica, consumo de cimento e teor de ar do concreto.

Traço - CAA	Massa específica fresca (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de ar (%)
	ρ_f	C	A
0%	2317,8	509,4	3,0
5%	2270,6	499,0	3,6
10%	2164,3	475,7	6,7
15%	2162,1	475,2	5,5
20%	2159,6	474,6	4,3

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Das Figura 42 a Figura 44 estão os resultados para massa específica (ρ_f), o consumo de cimento (C) e teor de ar (A), respectivamente. Com essas curvas é possível perceber com clareza o comportamento do CAA pela substituição de resíduo polimérico por brita.

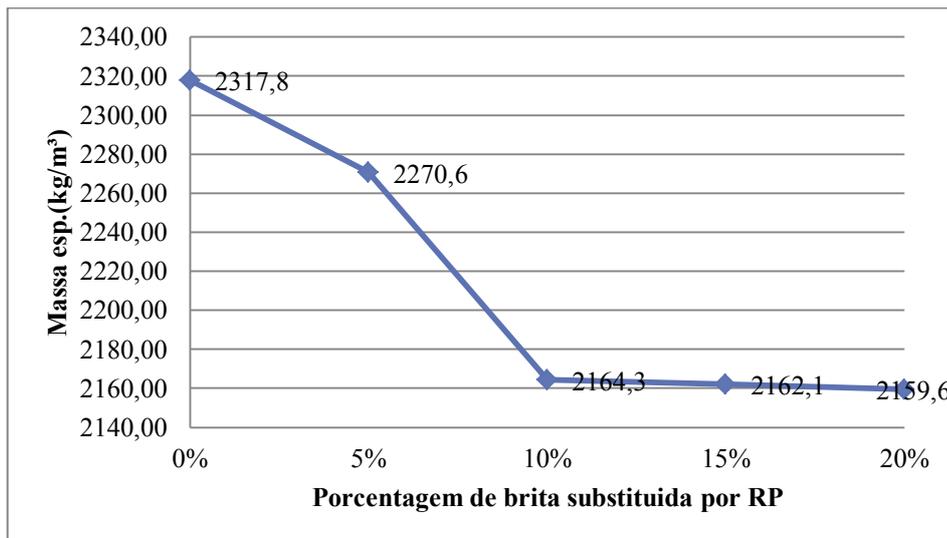


Figura 42: Massa específica do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

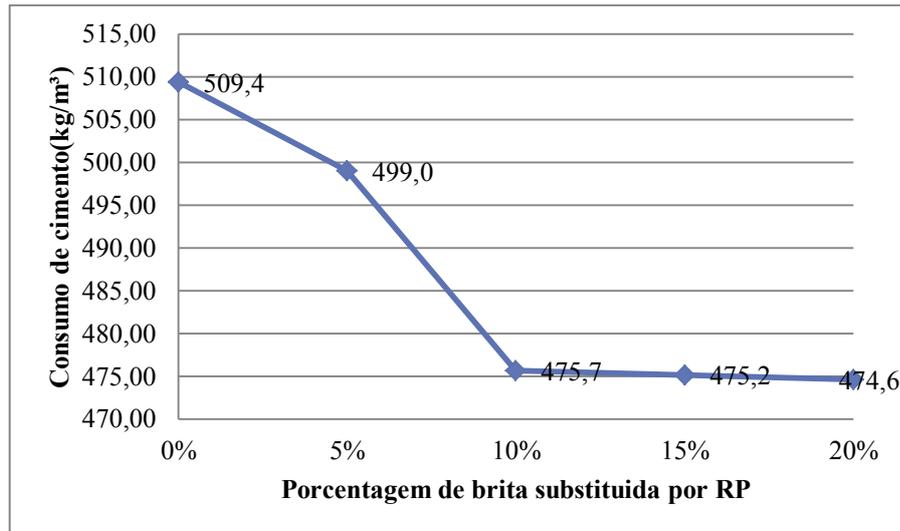


Figura 43: Consumo de cimento do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

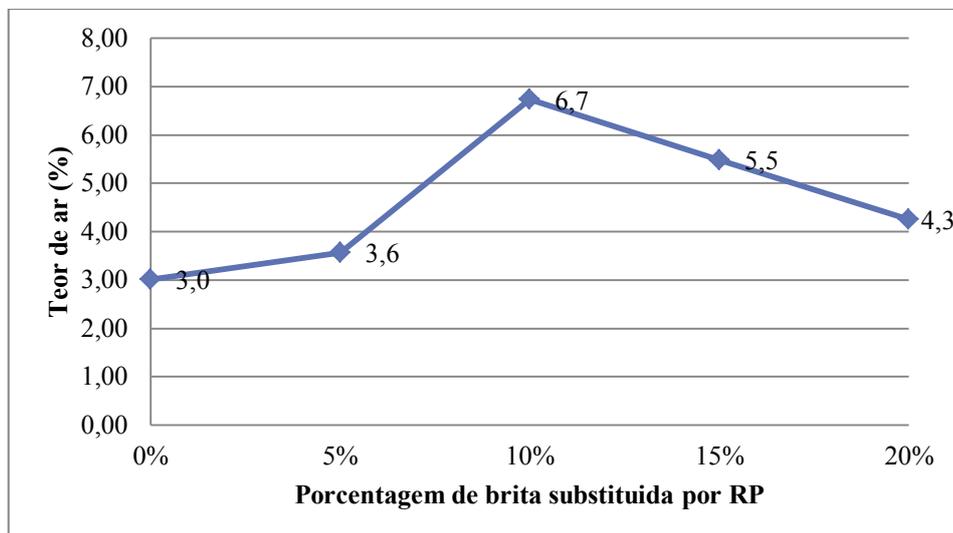


Figura 44: Teor de ar do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 26 e Figura 42 é possível perceber que a massa específica diminui gradativamente à medida que é adicionado resíduo polimérico, variando de 2317,8 kg/m³ para 2159,6 kg/m³, ou seja, uma diminuição de 6,8%. Contudo, os traços CAA 10%, CAA 15% e CAA 20% variam pouco entre suas massas específicas, a queda mais acentuada acontece entre o CAA 5% e o CAA 10%.

Pela Tabela 26 e Figura 43 é possível verificar que o consumo de cimento diminui com o aumento de resíduo adicionado, assim como ocorre com a massa específica. O consumo varia de 509,4 (kg/m³) a 474,6 (kg/m³).

Pela Tabela 26 e Figura 44 é possível verificar que o teor de ar tem comportamento não linear com pico no traço CAA 10%. O teor de ar varia de 6,7 % a 3,0 %. Esses resultados mostram que a substituição de RP por brita no CAA altera vários índices que estão ligados ao comportamento no estado fresco do concreto.

4.2.2. Ensaio de espalhamento (*Slump flow test*)

Os resultados para o ensaio de espalhamento do CAA são mostrados na Tabela 27 e Figura 45, realizados de acordo com a ABNT NBR 15823:2017. Sabendo que as classes de espalhamento são: SF1 – 550 mm a 650 mm; SF2 – 660 a 750 mm; SF3 – 760 a 850 mm.

Tabela 27: Ensaio de espalhamento do CAA com substituição de RP por brita

Traço	Slump flow test (mm)	Classes de espalhamento (ABNT NBR 15823-1:2017)
CAA 0%	795	SF3
CAA 5%	800	SF3
CAA 10%	810	SF3
CAA 15%	810	SF3
CAA 20%	840	SF3

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

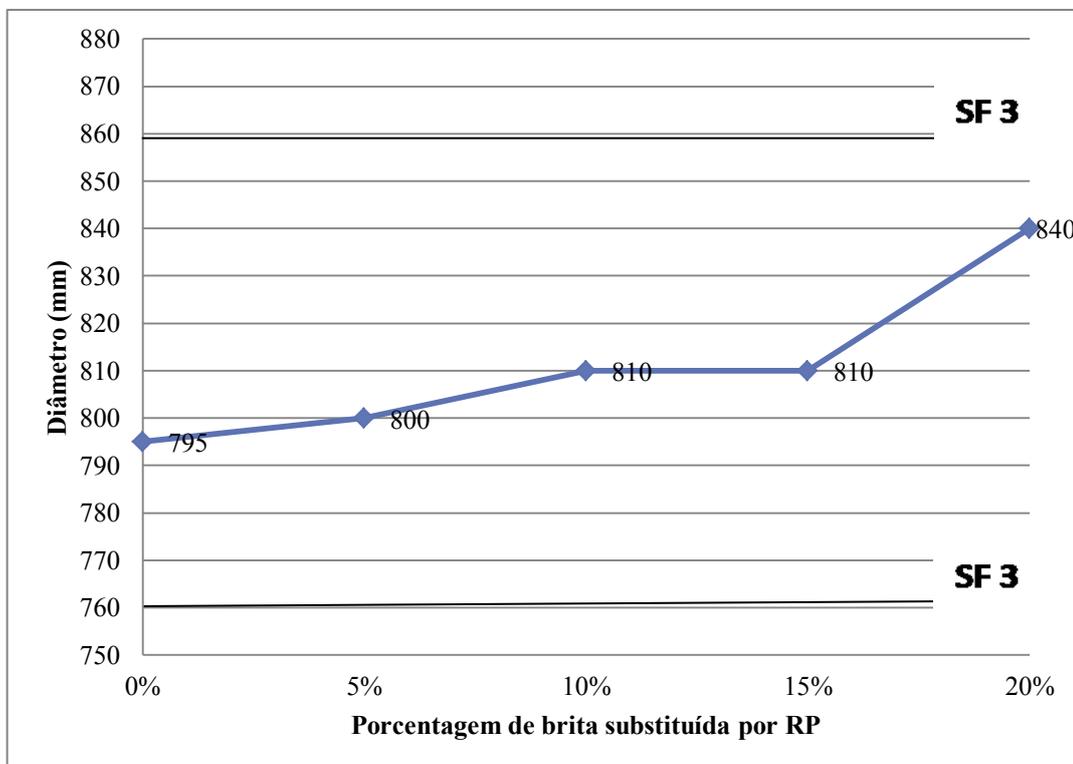


Figura 45: Diâmetro de espalhamento em função do percentual de substituição de resíduo polimérico de refrigeradores (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Com os resultados apresentados na Tabela 27 e Figura 45 é possível afirmar que a substituição de resíduo polimérico altera o comportamento de espalhamento do CAA no estado fresco. Sendo que quanto mais resíduo é adicionado maior é o espalhamento, ou seja, o polímero atua de forma a diminuir a consistência plástica (aumento de fluidez) ou diminuição da viscosidade do concreto fresco. Ocorre um aumento de 5,7% de diâmetro entre o CAA 0% e o CAA 20%.

Todos concretos são classificados na categoria SF3 e segundo a ABNT NBR 15823:2017 é recomendado seu uso em: “estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm). Por exemplo: pilares-parede, paredes diafragma e pilares”. Portanto, os resultados podem ser considerados satisfatórios para todos os CAA estudados, quanto ao espalhamento. Ficando dentro do estabelecido pela norma ABNT NBR 15823:2017, neste quesito. Nas Figura 46, Figura 47, Figura 48 são apresentados os ensaios de espalhamento dos traços CAA 0% e CAA 5%, CAA 10%, CAA 15% e CAA 20%, respectivamente.

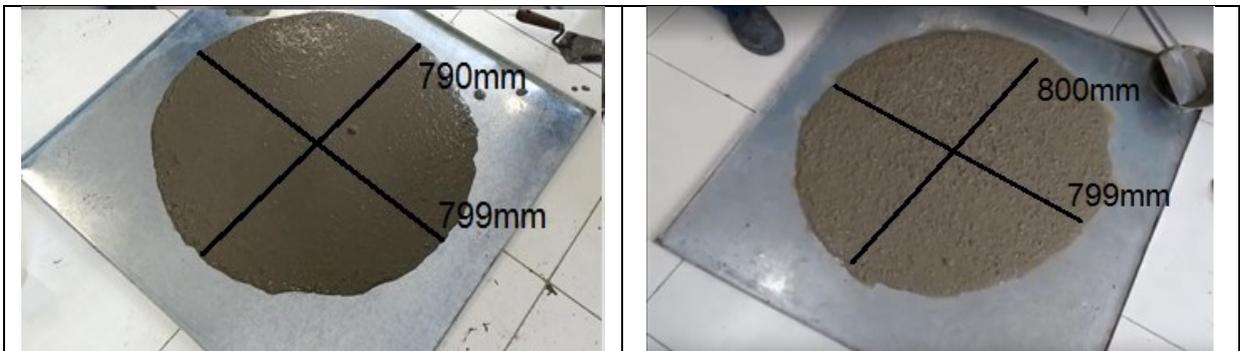


Figura 46: Ensaio de espalhamento do traço CAA 0% (esquerda) e CAA 5% (direita)
(Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

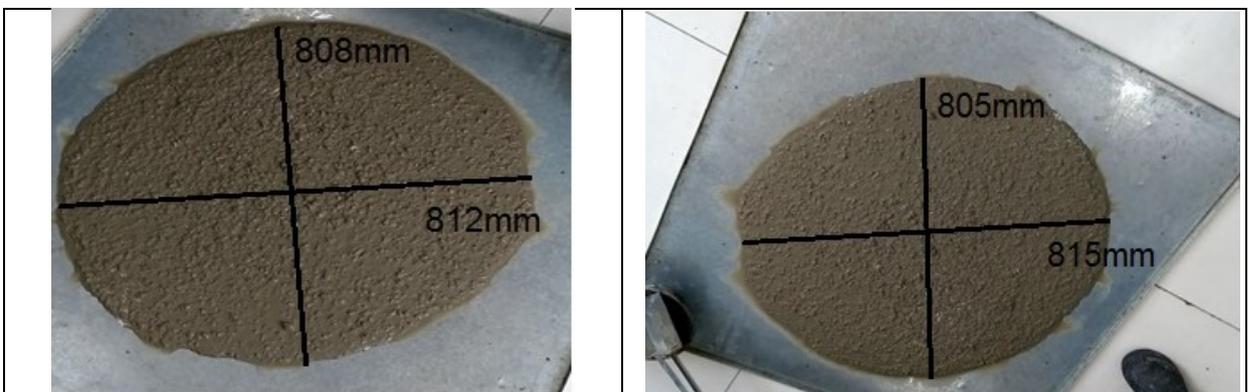


Figura 47: Ensaio de espalhamento do traço CAA 10% (esquerda) e CAA 15% (direita)
(Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

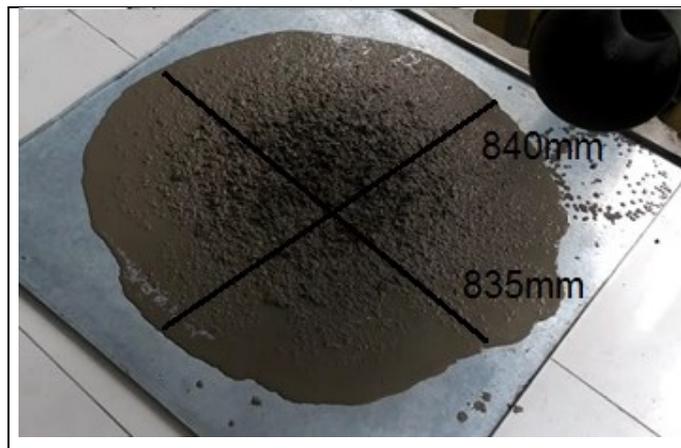


Figura 48: Ensaio de espalhamento do traço CAA 20%
(Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

4.2.3. Tempo de escoamento (*Slump flow test T500*)

Os resultados para o ensaio do tempo de escoamento (T500) do CAA são mostrados na Tabela 28 e Figura 49 que foram realizados de acordo com a ABNT NBR 15823:2017. As classes de viscosidade plástica aparente pelo tempo de escoamento (T500) segundo a ABNT NBR 15823-1:2017 são VS-1 para tempos menores ou iguais que 2 segundo ($\leq 2s$) e VS-2 para tempos maiores que 2 segundos ($> 2s$).

Tabela 28: Ensaio de escoamento do CAA com substituição de RP por brita

Traço	Tempo escoamento (s)	Classe de viscosidade plástica aparente t500 (ABNT NBR 15823-1:2017)
CAA 0%	2,50	VS 2 > 2s
CAA 5%	2,00	VS 1 \leq 2s
CAA 10%	2,00	VS 1 \leq 2s
CAA 15%	2,00	VS 1 \leq 2s
CAA 20%	1,50	VS 1 \leq 2s

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

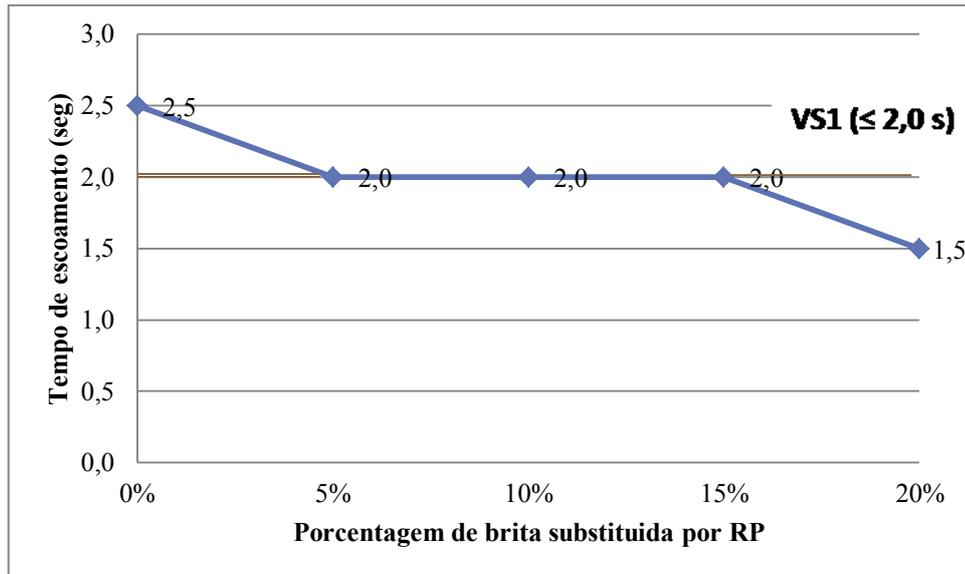


Figura 49: Teor de substituição de RP por tempo de escoamento (T500) em CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Com os resultados apresentados na Tabela 28 e Figura 49 é possível afirmar que a substituição de RP por brita altera o comportamento de viscosidade plástica do CAA no estado fresco. Sendo que quanto mais resíduo é adicionado menor é o tempo de escoamento. Ou seja, o polímero atua de forma a diminuir a viscosidade plástica (aumento de fluidez) do concreto fresco e diminuição da coesão. Ocorre uma diminuição no tempo de escoamento de aproximadamente 40%, entre o CAA 0% e o CAA 20%.

Com os valores obtidos, os concretos são classificados nas seguintes categorias: CAA 0% - VS 2; CAA 5% ao CAA 20% - VS 1. Segundo a ABNT NBR 15823:2017 é recomendado o uso do CAA 0% em:

Adequado para a maioria das aplicações correntes; apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação; efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas. Exemplo de aplicação: vigas e pilares (ABNT NBR 15823:2017).

Já para os demais CAA 5% ao CAA 20% é recomendado, segundo a ABNT NBR 15823:2017, sua aplicação em:

Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Exemplo de aplicação: paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente (ABNT NBR 15823:2017).

Portando, os resultados podem ser considerados satisfatórios para todos os CAA estudados. Quanto à viscosidade plástica aparente, ficando dentro do estabelecido pela norma ABNT NBR 15823:2017.

4.2.4. Índice de estabilidade visual (IEV)

Os resultados para o ensaio de IEV visual do CAA são mostrados na Tabela 29, realizados de acordo com a ABNT NBR 15823-2:2017. O IEV (sob fluxo livre) é dividido nas seguintes classes: IEV 0 – sem evidência de segregação ou exsudação; IEV 1 – Sem evidência de segregação e leve exsudação; IEV 2 – Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 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 (> 10 mm).

Tabela 29: Ensaio de índice de estabilidade do CAA com substituição de RP por brita

Traço	Índice de Estabilidade Visual (IEV)
CAA 0%	IEV 0
CAA 5%	IEV 0
CAA 10%	IEV 0
CAA 15%	IEV 1
CAA 20%	IEV 3

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Observa-se que para o CAA com 0%, CAA 5% e CAA 10% de RP o IEV é zero, ou seja, não ocorre segregação ou exsudação da água de amassamento. Para os traços de CAA com 15% de RP o IEP é classificado como 1 (um), ou seja, o concreto não está ideal, mas apresenta-se em bom estado de homogeneidade e não apresentam traços de segregação. Já o CAA com 20% de RP é classificado como categoria 3 (três), ficando o CAA neste teor de substituição de RP por brita com grande segregação e exsudação dos seus agregados, então inviável sua utilização como CAA. Comparando os resultados desta figura para as diferentes substituições de RP por brita fica claro que com o aumento do percentual de substituição ocorre perda da estabilidade do concreto, ocasionando segregação dos seus agregados. Possivelmente, a forma e a textura do RP devem estar afetando o CAA, visto que no ensaio de escoamento do CAA (T500 e Funil V) o tempo também aumenta. Isto evidencia que a forma dos resíduos altera as condições no estado fresco, e sempre devem ser levadas em consideração no momento de sua substituição no CAA. Na Figura 50 são mostrados os IEV

para CAA 0% e CAA 5%, já na Figura 51 é mostrado IEV para CAA 10% e CAA 15% e na Figura 52 é mostrado IEV para CAA 20%.



Figura 50: IEV para CAA 0% (esquerda) e CAA 5% (direita) (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).



Figura 51: IEV para CAA 10% (esquerda) e CAA 15% (direita) (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).



Figura 52: IEV para o CAA 20% (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Portando, os resultados podem ser considerados satisfatórios somente para os CAA de 5% a 15% com substituição de RP por brita segundo a ABNT NBR 15823:2017. O traço com 20% de substituição de RP por brita não obtém resultados satisfatórios quanto ao IEV. Ficando comprometida a estabilidade e homogeneidade do CAA, com essa proporção de resíduo polimérico. Ou seja, ocorre visível segregação com concentração de agregados no centro e dispersão de argamassa nas extremidades.

4.2.5. Viscosidade plástica aparente (funil V)

Os resultados para o ensaio de viscosidade do concreto são mostrados na Tabela 30 e Figura 53, realizados de acordo com a ABNT NBR 15823:2017. Quanto a esse ensaio pode se classificar o CAA em: VF 1, para tempo de escoamento menor que 8 s ($\leq 8s$) e VF 2, para tempo de escoamento entre 9s a 25s.

Tabela 30: Ensaio de viscosidade plástica no funil “V” do CAA com substituição de RP por brita

Traço	Tempo escoamento (s)	Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V ABNT NBR 15823-1:2017.
CAA 0%	5,00	VF 1
CAA 5%	4,50	VF 1
CAA 10%	4,50	VF 1
CAA 15%	4,50	VF 1
CAA 20%	3,00	VF 1

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

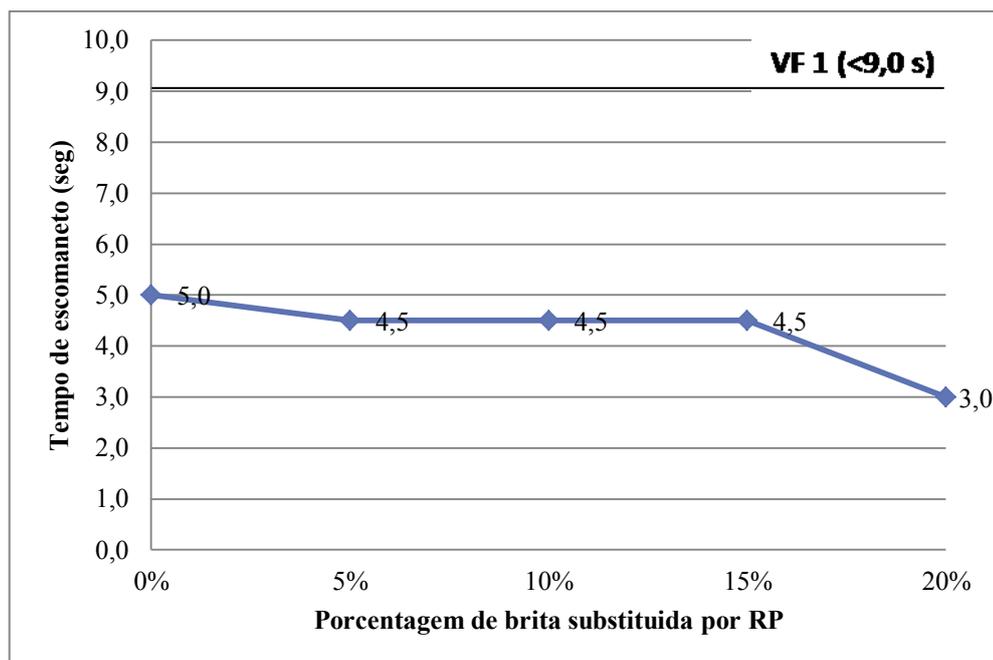


Figura 53: Tempo de escoamento no funil “V” do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Analisando os resultados da Tabela 30 e Figura 53 é possível verificar que a substituição de RP por brita altera as propriedades no estado fresco, neste caso, a viscosidade do CAA. À medida que é adicionado resíduo ocorre perda de viscosidade e coesão, pois, o tempo de escoamento diminui. O tempo de escoamento completo do concreto pelo funil varia de aproximadamente 5,0 a 3,0 s; isso representa uma diminuição de 40%. Segundo a ABNT NBR 15823:2017 o concreto com essas características pode ser usado em:

Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Exemplo de aplicação: paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concretos aparentes ABNT NBR 15823:201.

Portando, os resultados podem ser considerados satisfatórios para todos os CAA estudados quanto à viscosidade plástica aparente pelo funil V, ficando dentro do estabelecido pela norma ABNT NBR 15823:2017.

4.2.6. Habilidade passante (Caixa L)

Os resultados para o ensaio de habilidade passante do concreto são mostrados na Tabela 31 e Figura 54 e foram realizados de acordo com a ABNT NBR 15823:2017. Para esse ensaio é considerado satisfatório o concreto que obtiver relação H2/H1, maior que 0,80, com duas barras de aço, sendo classificado como (PL1). E maior que 0,80, com três barras de

aço, sendo classificado como (PL2). Nota que para a pesquisa foi utilizado caixa L com três barras de aço.

Tabela 31: Ensaio de habilidade passante do CAA com substituição de RP por brita

Traço	Habilidade passante pela caixa L (H2/H1)	Classes de habilidade passante pela caixa L (ABNT NBR 15823-1:2017)
CAA Referência	0,95	PJ 2
CAA 5%	0,98	PJ 2
CAA 10%	1,00	PJ 2
CAA 15%	1,00	PJ 2
CAA 20%	1,00	PJ 2

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

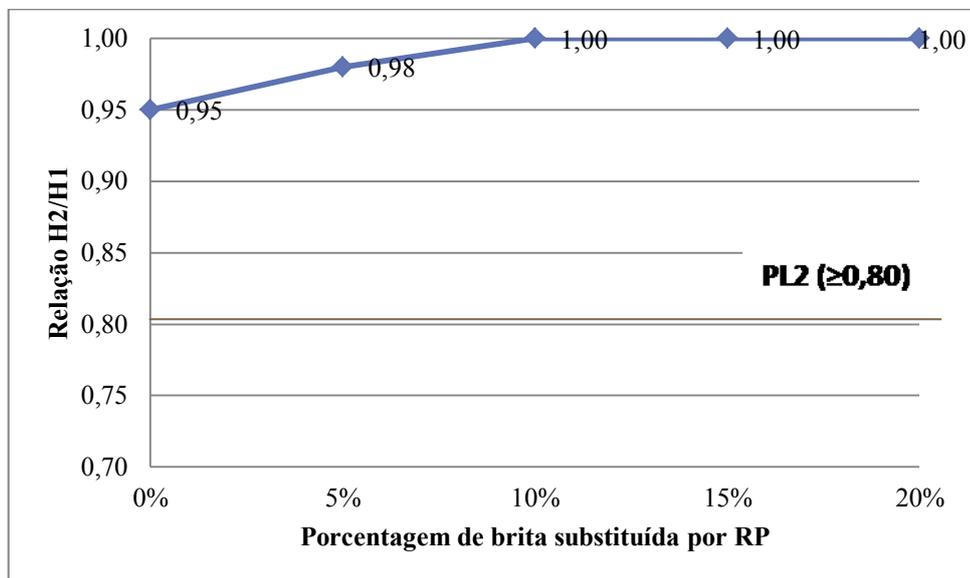


Figura 54: Ensaio de habilidade passante caixa L do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Na Figura 55 é mostrada a realização do ensaio de habilidade passante pelo método da caixa L para o traço CAA 0% com base na ABNT NBR 15823:2017.



Figura 55: Ensaio de habilidade passante caixa L do CAA com substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 31 e no Figura 54 é possível afirmar que a substituição de RP por brita altera a propriedade no estado fresco do concreto de habilidade passante. A substituição de RP por brita atua de forma a melhorar a habilidade passante do CAA. Apesar de todos os traços atenderem satisfatoriamente este requisito normativo, vale ressaltar que a partir dos traços CAA 10% foi atingido valor máximo de habilidade passante.

A Tabela 32 compara os valores de alguns ensaios no estado fresco obtidos nesta pesquisa, com três autores que produziram CAA, com resíduos poliméricos. Os valores expostos na Tabela 32 compõem todos os traços desta pesquisa, e de modo resumido, um traço selecionado dos autores mencionados em cada ensaio.

Como forma de comparação, têm-se na literatura alguns autores que realizaram trabalhos parecidos e que obtiveram resultados consistentes para análise no estado fresco do CAA, segue o resumo das conclusões para alguns trabalhos pesquisados:

Al-Hadithi e Hilal (2016) adicionaram fibras plásticas residuais de corte de garrafas de bebidas (PET) em diferentes proporções no CAA. Substituindo o agregado miúdo, essas substituições foram de 0%; 0,25%; 0,50%; 0,75%; 1,00%; 1,25%; 1,50%; 1,75% e 2,00%. Em comparação aos resultados desse trabalho Al-Hadithi e Hilal (2016), obteve de maneira geral diminuição no espalhamento, aumento da viscosidade plástica e perda de habilidade passante e utilizou uma relação a/c de 0,35. Em contra partida, neste trabalho, o RP atuou de forma a aumento o espalhamento, diminuir a viscosidade e ganho de habilidade passante e a relação

a/c foi 0,46, ou seja, acima da usado por Al-Hadithi e Hilal (2016). Uma comparação dos valores obtidos em cada ensaio é mostrado na Tabela 32. Provavelmente o comportamento distinto encontrado entre os dois trabalhos é devido a diferença da natureza física dos agregados, uma vez que o RP possui granulometria mais grosseira substituindo o agregado graúdo, maior rugosidade superficial com formato pontiagudo e irregular, se comparado ao resíduo de corte de garrafas.

Angelin (2018) produziu CAA leve e emborrachado com adição de argila expandida e borracha de pneu. Foram produzidos traços com diferentes proporções de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo. Essas substituições foram de 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25% e 50%. Angelin (2018) obteve valores de espalhamento na faixa de 550 a 560 mm, viscosidade plástica no funil V de 5,0 a 7,0 s e habilidade passante na caixa L de 0,80 a 0,85. Fazendo uma comparação com esse trabalho é possível verificar que Angelin (2018) teve valores de espalhamento levemente aumentados, perda de viscosidade e leve ganho na habilidade passante. O comportamento observado pela autora é semelhante ao observado neste trabalho, exceto na perda de viscosidade em que o RP neste trabalho atuou de forma a diminuir a viscosidade plástica. Com relação à proporção a/c, a autora utiliza uma proporção de a/c de 0,43, ligeiramente inferior a utilizada neste trabalho que foi de 0,46. Uma comparação dos valores obtidos em cada ensaio é mostrado na Tabela 32.

R. Kumayama (2015) produziu CAA com pó de mármore como finos e poliestireno expandido (EPS) em substituição de parte dos agregados graúdos e miúdos. As substituições de (EPS) foram de 0%; 5%; 10%; 20%; 30% e 40%. Em comparação aos resultados desse trabalho R. Kumayama (2015), obteve de maneira geral diminuição no espalhamento, aumento da viscosidade plástica e perda de habilidade passante e utilizou uma relação a/c de 0,46. Com portamento inverso foi encontrado neste trabalho, em que a substituição de RP por brita atuou de forma a aumentar o espalhamento, diminuir a viscosidade e aumento da habilidade passante, contudo a relação a/c utilizada foi a mesma 0,46. Uma comparação dos valores obtidos em cada ensaio é mostrado na Tabela 32. Os resultados contrários encontrados podem ser atribuídos ao formato e rugosidade do RP se comparado ao poliestileno espendido, além do que o RP está substituindo o agregado graúdo e não o miúdo.

Tabela 32: Comparação dos resultados obtidos no estado fresco do CAA com resíduo polimérico com os obtidos por outros autores de trabalhos similares a esta pesquisa.

Ensaio/ parâmetro	Traços desta pesquisa					Autores		
	CAA 0%	CAA 5%	CAA 10%	CAA 15%	CAA 20%	Al-Hadithi e Hilal (2016)	Angelin (2018)	R. Kumayama (2015)
Relação água/cimento	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,35	0,43	0,46
Espalhamento (mm)	795	800	810	809	840	780,0 a 650,0	550,0 a 560,0	700,0 a 617,5
T500(s)	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	3,0 a 12,0	-	4,0 a 0,7
Funil V (s)	5,0	4,5	4,5	4,5	3,0	9,0 a 12,0	5,0 a 7,0	5,4 a 2,5
Caixa L	0,95	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00 a 0,75	0,80 a 0,85	0,76 a 0,85

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Como é mostrado na Tabela 32 a relação a/c utilizada nesta pesquisa é ligeiramente superior à utilizada nos trabalhos de Al-Hadithi e Hilal (2016) e Angelin (2018), mas é igual à utilizada por R. Kumayama (2015). Quanto ao ensaio de espalhamento que mede a habilidade de preenchimento, foram obtidos valores superiores aos três trabalhos comparados, na mesma medida em que os valores do ensaio de T500 são menores aos trabalhos comparados. O tempo de escoamento pelo Funil V foi inferior ao obtido por Al-Hadithi e Hilal (2016) e Angelin (2018), já o obtido por R. Kumayama (2015) ficou na mesma faixa ao encontrada nesta pesquisa. A habilidade passante medida pelo ensaio da Caixa L obteve resultados superiores a todos os trabalhos comparados.

Hama e Hilal (2017) investigaram o uso de resíduos de plásticos (PET) como substituição parcial de agregados finos em CAA. Como resultados, foram obtidos perda nos valores de espalhamento, variando na faixa de 675 a 710 mm; perda de viscosidade com aumento do tempo nos ensaios de T500; diminuição da habilidade passante, mas os valores de H1/H2 ficaram acima de 0,80. Em contrapartida neste trabalho foi encontrado ganho de espalhamento com adição de RP, com valores variando na faixa de 795 a 840 mm; aumento da habilidade passante com valores acima de 0,80.

Sadrmomtazi (2016) objetiva em seu trabalho produzir CAA com polietileno tereftalato (PET) e materiais pozolânico como substituição parcial de agregado miúdo e investigar sua propriedades. As porcentagens de substituição foram 5,10 e 15%. Os resultados mostram que a adição de PET atuou negativamente no estado fresco do CAA, com diminuição de fluidez e perda da habilidade passante. Comportamento oposto foi encontrado

para este trabalho em que ocorre aumento de fluidez e habilidade de preenchimento ou passante.

Ghernouti (2015) em seu trabalho produz CAA com adição de fibras de resíduos de sacos plásticos, os comprimentos das fibras variam de 2,4 e 6 cm e diferentes níveis de incorporação variando de 1, 3, 5 e 7 kg/m³ e duas outras misturas, uma com 1 kg/m³ de fibras de polipropileno (PFSCC). Encontra a que a incorporação de fibras provoca aumento do espalhamento, melhora na habilidade passante. Em comparação com este trabalho a incorporação de RP atua de maneira semelhante, forma a melhorar a habilidade espalhamento e habilidade passante.

Os comportamentos distintos encontrados nos trabalho que por ventura foram usados como forma de comparação com este, pode ser atribuído principalmente pelo fato de que nas maiorias das situações resíduos substituem o agregado miúdo e não o graúdo como neste trabalho. Vale ressaltar que no CAA é comumente empregada a substituição e/ou adição de resíduos nos agregados finos ou miúdo, tais com cimento e areia. Contudo, neste trabalho o CAA produzido teve a substituição do resíduo realizada no lugar do agregado graúdo, o que difere da maioria das pesquisas executadas em CAA com resíduos.

Com os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa pode se verificar que foi atingido o objetivo de se fabricar CAA modificado com resíduo polimérico. No entanto, foi necessário utilizar um alto teor de argamassa, em torno de 65 % e conseqüentemente alto consumo de cimento, próximo de 500 kg/m³. Tendo em vista que o resíduo a ser adicionado possui massa específica baixa (1,33 g/cm³) e baixa resistência mecânica, por ser um polímero, autores como Utama (2012), Rossignolo (2009) e Jalal (2012) já fazem essas recomendações. Pois, ao contrário do concreto convencional (CCV) em que o agregado é a fase mais resistente, neste caso a argamassa se torna a fase mais resistente e os agregados a fase mais frágil. Com isso, para se ter concreto estrutural com polímero foi necessário um alto consumo de cimento.

4.3. Propriedades no estado endurecido

Nesta etapa do trabalho de pesquisa foram realizadas as análises referentes às propriedades no estado endurecido do concreto. Para tanto, os seguintes ensaios foram realizados: resistência à compressão longitudinal, compressão diametral (tração), massa

específica, índice de vazios, absorção de água, módulo de elasticidade dinâmico, resistividade elétrica, microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.3.1. Ensaio de resistência à compressão longitudinal

Na Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36 são mostrados os valores do ensaio de resistência à compressão dos concretos de 7 a 91 dias de cura, realizados conforme ABNT NBR 5739:2018. A Figura 56 ilustra a variação das resistências nas diferentes adições de resíduos por idade de cura.

Tabela 33: Resistência à compressão em (MPa) aos 7 dias de cura do CAA.

Traço CAA	Porcentagem de RP	Compressão longitudinal	
		Média	Desvio padrão
CAA 0	0%	53,9	2,2
CAA 5	5%	38,7	1,5
CAA 10	10%	30,5	1,0
CAA 15	15%	23,8	1,1
CAA 20	20%	20,2	2,1

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Tabela 34: Resistência à compressão em (MPa) aos 14 dias de cura do CAA.

Traço CAA	Porcentagem de RP	Compressão longitudinal	
		Média	Desvio padrão
CAA 0	0%	55,7	1,8
CAA 5	5%	38,7	2,1
CAA 10	10%	33,1	3,0
CAA 15	15%	25,1	1,4
CAA 20	20%	21,5	2,4

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Tabela 35: Resistência à compressão em (MPa) aos 28 dias de cura do CAA.

Traço CAA	Porcentagem de RP	Compressão longitudinal	
		Média	Desvio padrão
CAA 0	0%	56,8	3,3
CAA 5	5%	41,1	2,0
CAA 10	10%	38,1	1,2
CAA 15	15%	28,2	2,2
CAA 20	20%	24,7	3,0

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Tabela 36: Resistência à compressão em (MPa) aos 91 dias de cura do CAA.

Traço CAA	Porcentagem de RP	Compressão longitudinal	
		Média	Desvio padrão
CAA R	0%	52,5	3,2
CAA 5	5%	38,3	1,8

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

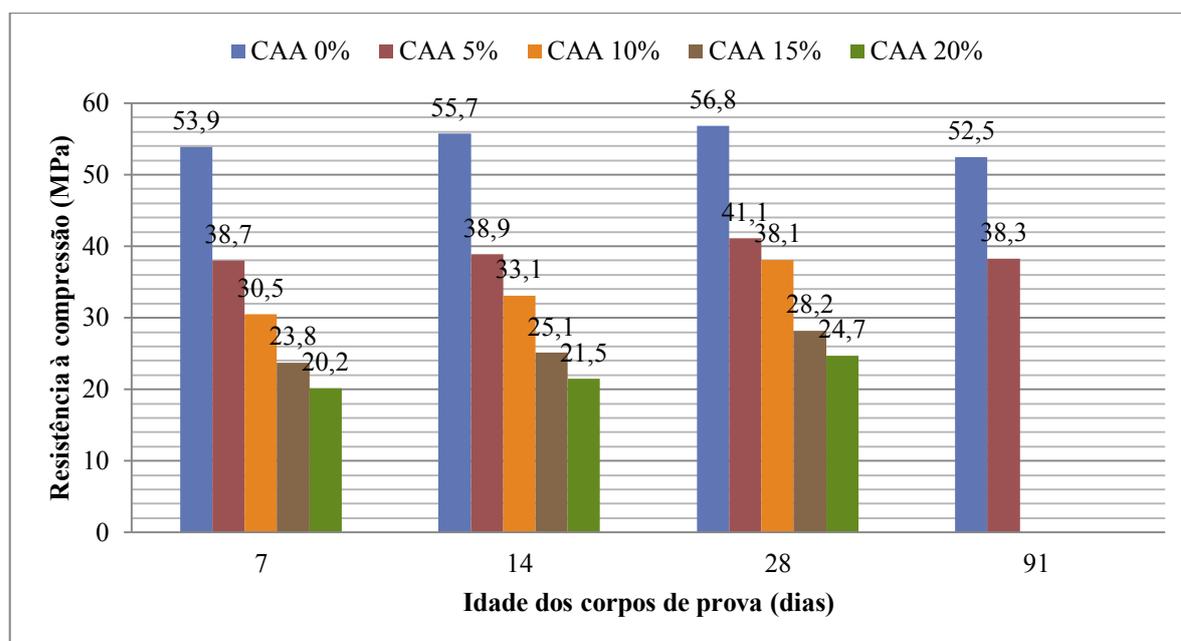


Figura 56: Resistência à compressão longitudinal em função da substituição de resíduo no CAA em diferentes idades (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Pela análise dos resultados para o ensaio de compressão longitudinal, nas Tabela 33 a Tabela 36 e na Figura 56. Pode se verificar que ocorre uma gradual diminuição da resistência à compressão à medida que se adiciona o polímero reciclado. Analisando os traços com 28 dias de cura, o melhor resultado ficou com o CAA referência, com 56,8 MPa e pior o CAA com 20% de RP com 24,7 MPa aos 28 dias de cura. Esse valor representa uma diminuição percentual de 56,4% entre os dois traços. Esse comportamento mecânico se repete para todas as idades analisadas de 7 a 28 dias de cura. Fato esse que pode ser explicado pela substituição gradual de um agregado graúdo (brita ou pedrisco) de relativa alta resistência e massa específica, por um de baixa resistência (resíduo polimérico) e baixa massa específica que possuem comportamentos diferentes e composições químicas diferentes (KUMAYAMA, 2015). Também o fato que o resíduo polimérico possui superfície de pouca adesão com o concreto e isso torna o material como um todo menos resistente (THOMAS e GUPTA, 2015). Pode ser observado nos ensaios de MEV, discutidos no item 4.3.7, que o RP não se adere adequadamente à pasta de cimento.

Em concretos que tenham adição de polímero ou emborrachados, a queda na resistência é devido à fraca ligação entre a partícula de borracha e a matriz da pasta de cimento (HERRERA-SOSA, 2015; SILVA, 2015). Além disso, devido à superfície grosseira do agregado reciclado são produzidos muitos espaços de vazios, o que aumenta a porosidade. As adições minerais que agem como *fillers* (finos) no CAA podem mitigar esse efeito, pois, essas partículas finas das adições minerais preenchem os vazios existentes (GÜNEYISI, GESOGLU, *et al.*, 2015).

Apesar da substituição de RP por brita diminuir sensivelmente a resistência à compressão, pode se encontrar um valor mínimo de aproximadamente 24,7 MPa para o CAA 20%. Segundo a ABNT NBR 8953:2015, o CAA com resíduo é classificado como classe de resistência Grupo II que engloba os valores entre 24,7 a 41,1 MPa e que podem ser utilizados para fins estruturais ABNT NBR 6118: 2014.

Pelas Tabela 33 a Tabela 36 e Figura 56, também pode ser verificado um gradual aumento de resistência para todos os traços ao longo das idades de cura. Como o cimento utilizado foi do tipo CPV de alta resistência inicial é de se esperar que nas primeiras idades de cura seja encontrada elevada resistência. Por esse motivo, a NBR 16697:2018 somente especifica resistências mínimas a serem atingidas nas idades de 1, 3 e 7 dias de cura para cimento tipo CPV. É verificado que aos 91 dias os traços analisados (CAA 0% e CAA 5%) sofrem uma ligeira perda de resistência, evidenciando perda de durabilidade. Esse fato pode ser correlacionado com o alto consumo de cimento dos traços, como pode ser visto na Tabela 26 e Figura 43 que chega a ser maior a 500 kg/m³ nos traços CAA 0% e CAA 5%, respectivamente.

Como forma de comparação, têm-se na literatura alguns autores que realizaram trabalhos parecidos e que obtiveram resultados consistentes para análise da resistência à compressão axial, segue o resumo das conclusões para alguns trabalhos pesquisados:

Al-Hadithi (2016) que desenvolveu CAA com adição de fibras de plásticos de garrafas de bebidas (PET) em substituição ao agregado miúdo. A adição deste resíduo contribuiu para o aumento da resistência à compressão longitudinal; e entre as misturas estudadas a que tiveram menor resistência foi a de 2% de substituição. Concretos de resistência acima de 40 MPa foram produzidos na maior parte dos traços. Comparando o trabalho de Al-Hadithi (2016) com o este trabalho, em que ocorreu perda de resistência à compressão axial, deve se

levar em conta o fato de estar trabalhando com fibras e não com partículas, e substituição do agregado miúdo e não graúdo contribuí com os resultados encontrados. E o fato de ser muito menor o percentual de substituição se comparado com os traços desta pesquisa.

Aslani (2018) desenvolveu CAA com adição de resíduo de borracha de pneu e resíduos concretos reciclados. No ensaio de compressão observou-se que a utilização do resíduo de borracha de pneu diminui gradualmente a resistência à compressão, sendo a substituição de 40% que obteve resistência de menor valor. Comparando os resultados de Aslani (2018) e levando em conta que foi utilizado substituição no agregado miúdo e não no graúdo, pode se encontrar uma concordância de valores. Pois, nos dois trabalhos há diminuição de resistência à medida que se aumenta as adições de polímero. E também outros autores que realizaram trabalhos na mesma linha de pesquisa e que obtiveram essa tendência de diminuição da resistência à compressão com adição e/ou substituição de resíduo: Mohammed (2019), Angelin (2018), Hama e Hilal (2017), Sadrmomtazi (2016), Kumayama (2015), Ghernouti (2015), Thomas e Gupta (2015), Aliabdo (2012), Girskas e Nagrockiene (2017).

4.3.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 37 são mostrados os valores do ensaio de resistência à tração dos concretos realizados conforme ABNT NBR 7222:2011. A Figura 57 ilustra a variação das resistências nas diferentes adições de resíduos.

Tabela 37: Resistência à tração por compressão diametral em (MPa) aos 28 dias de cura, para o CAA com resíduo polimérico

TRAÇO CAA	Porcentagem de RP	Média	Desvio padrão
CAA R	0%	5,7	0,2
CAA 5	5%	3,9	0,1
CAA 10	10%	3,2	0,1
CAA 15	15%	2,8	0,1
CAA 20	20%	2,3	0,2

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

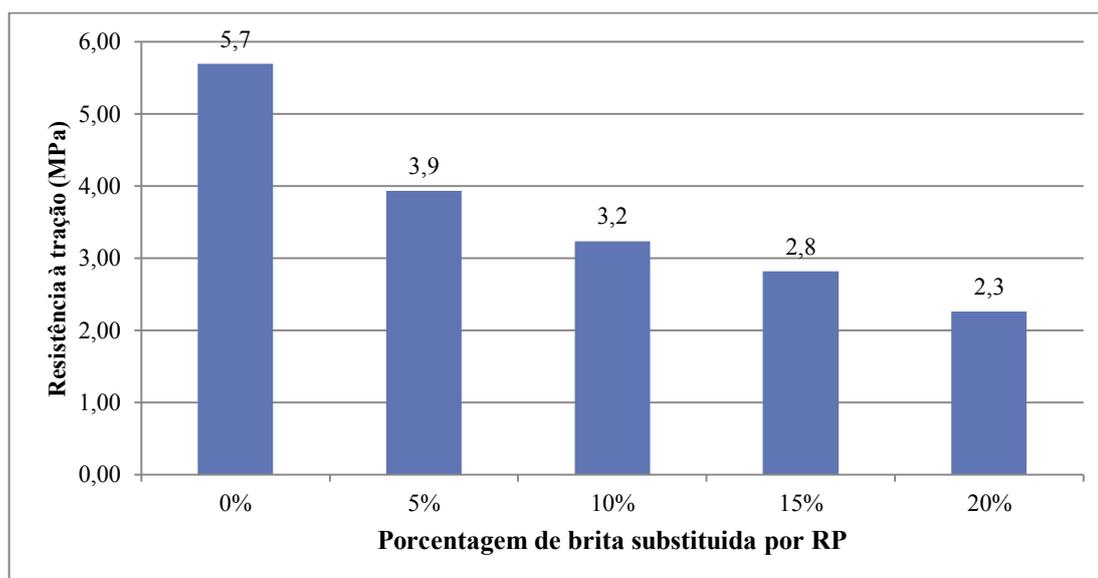


Figura 57: Resistência à tração por compressão diametral (MPa) aos 28 dias de cura em função do percentual de substituição de RP por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

O ensaio de tração (ou compressão diametral) normalizado pela ABNT NBR 7222:2011 é apresentado na Tabela 37 e na Figura 57 realizado aos 28 dias para todos os traços. Nos resultados a tração observou-se coerentes com os de compressão longitudinal. Sendo que a resistência à tração obteve valor em torno de 5% da resistência à compressão, ocorrendo gradual diminuição da resistência ao longo das adições de polímero reciclado.

Esse fato também pode ser explicado pela natureza de baixa resistência do resíduo adicionado e baixa adesão entre concreto e resíduo, como também observado no ensaio de resistência à compressão. Os seguintes autores também observaram tendências similares em seus estudos: Mohammed (2019), Angelin (2018), Hama e Hilal (2017), Sadrmomtazi (2016), Kumayama (2015), Ghernouti (2015), Thomas e Gupta (2015), Aliabdo (2012), Girskas e Nagrockiene (2017).

4.3.3. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Na Tabela 38 são mostrados os valores dos ensaios de massa específica e na Tabela 39 os valores dos ensaios de índice de vazios e absorção dos concretos realizados conforme ABNT NBR 9778:2009. A Figura 58 ilustra a variação das massas específicas nas diferentes adições de resíduos.

Tabela 38: Massa específica do CAA com resíduo polimérico

CAA traço	Massa específica (pe) (kg/m ³)	Desvio padrão
0%	2297,3	99,2
5%	2260,8	98,9
10%	2225,2	97,5
15%	2167,9	104,9
20%	1870,1	78,4

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Tabela 39: Absorção e índice de vazios do CAA com resíduo polimérico

CAA traço	Absorção de água (A) (%)	Índice de vazios (I) (%)
0%	3,8	3,6
5%	3,9	3,7
10%	3,9	4,1
15%	3,9	3,9
20%	4,5	4,3

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

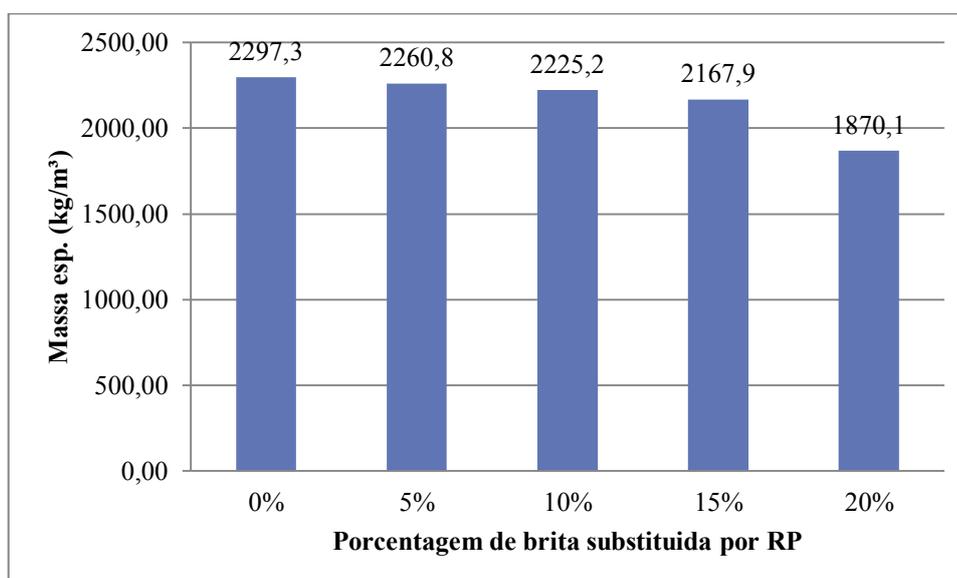


Figura 58: Massa específica do CAA com substituição de resíduo polimérico por brita (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

O ensaio de massa específica para os concretos do estado endurecido são apresentados na Tabela 38 e Figura 58. Pode ser verificado que a massa específica diminui gradualmente de acordo com a substituição de RP por brita, ocorrendo um decréscimo de 18,6% entre o CAA 0% e CAA 20%. Comportamento esse semelhante ao ocorrido no estado fresco, Figura 42. Esse fato também pode ser explicado pela substituição de um agregado denso (brita) por um

menos denso (resíduo polimérico) que afeta a massa por unidade de volume do material analisado.

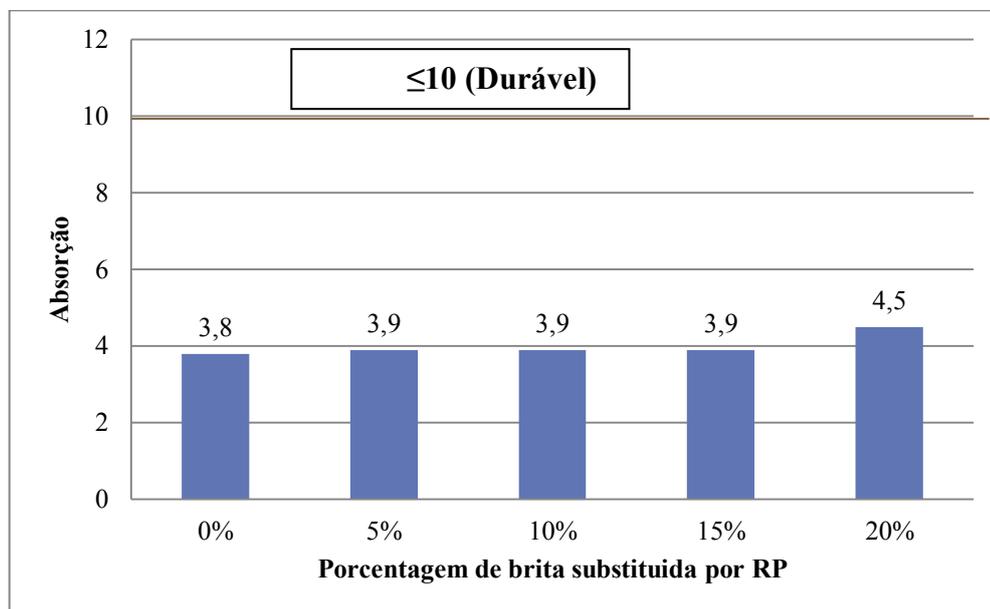


Figura 59: Absorção de água no CAA em função da substituição de brita por resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

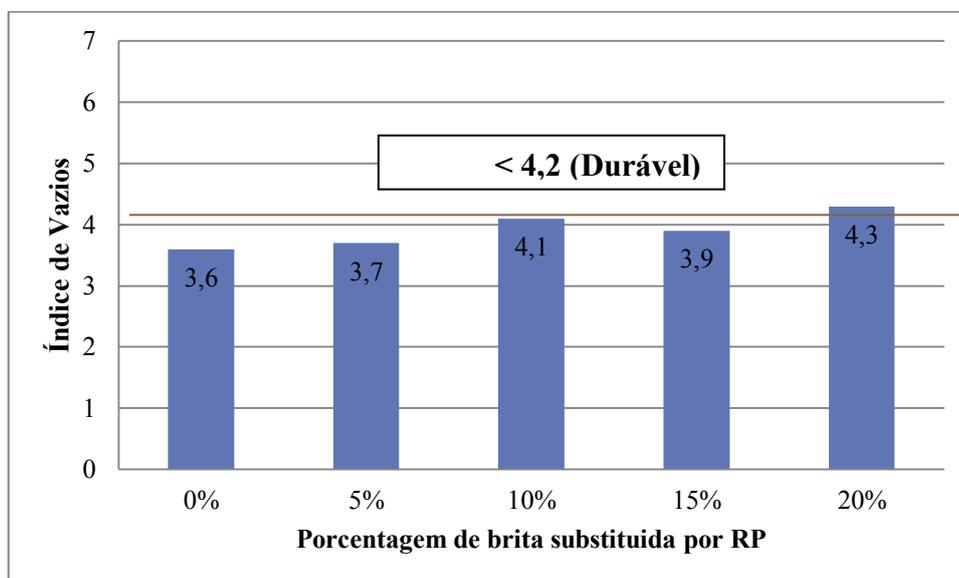


Figura 60: Índice de vazios no CAA com substituição de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Quanto à absorção de água e índice de vazios, pode ser observado na Tabela 39 que a substituição de resíduo polimérico provoca variação nesses dois índices. Neste caso, ocorre aumento em ambos, chegando a uma variação percentual de 18,8% em absorção de água e 18,1% em índice de vazios entre CAA 0% e CAA 20%. Esse aumento certamente está relacionado à tendência hidrofóbica do polímero. Também sua superfície irregular e grosseira

que colabora para o aumento do volume de vazios na matriz cimentícia (GIRSKAS e NAGROCKIENE, 2017; BING e NING, 2014).

Com base nos critérios de avaliação da qualidade do concreto indicado na Tabela 40. O concreto pode se classificado como durável quanto à porosidade, uma vez que todos os traços apresentam índice de vazios abaixo de 10 %, ver Figura 60. Quanto à absorção de água, todos os traços podem ser considerados duráveis, exceto o traço CAA 20% com absorção de água na faixa de variação 4,2 a 6,3%, se classificando como normal, ver Figura 59.

Tabela 40: Critérios para avaliação da qualidade do concreto

Classificação	Porosidade I (%)	Absorção de água A (%)
Deficiente	≥ 15	> 6,3
Normal	10 a 15	4,2 a 6,3
Durável	≤ 10	< 4,2

Fonte: Adaptado de HELENE e TERZIAN, 1992.

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com os obtidos por Angelin (2018) como é mostrado na Tabela 41. A autora produz CAA com adição de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo mais argila expandida. Apesar dos agregados poliméricos não serem os mesmo e estarem sendo substituído pelo agregado miúdo e não pelo gráudo é valida a comparação. Uma vez que se trata dos mesmos ensaios e o concreto em questão é CAA.

Tabela 41: Massa específica, Absorção e Índice de Vazios obtidos nesta pesquisa e na pesquisa de (Angelin, 2018).

Índices	Neste trabalho	Angelin (2018)
Massa específica (kg/m ³)	2297,3 a 1870,1	2580,0 a 1680,0
Absorção	3,8 a 4,5	4,0 a 11,5
Índice de Vazios	3,6 a 4,3	8,5 a 17,0

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Por meio dos dados da Tabela 41 é possível verificar que os valores de massa específica para os dois trabalhos comparados são similares. Contudo, no trabalho de Angelin (2018) foram obtidos uma maior variação dos resultados, ou seja, ocorreu uma menor dispersão. Com relação à absorção e índice de vazios, as faixas de valores obtidos neste trabalho são inferiores a faixa de valores obtidos por Angelin (2018). Certamente a variação da massa específica na pesquisa de Angelin (2018) foi maior por a autora ter utilizado maiores valores de substituição de borracha de pneu (variando de 0 a 50% em relação à areia). Já para os valores de absorção e índice de vazios deste trabalho terem dado abaixo dos valores

encontrados por Angelin (2018), pode se atribuir à granulometria e superfície antiaderente do resíduo polimérico terem contribuído para os menores valores desses índices.

4.3.4. Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

Na Tabela 42 são mostrados os valores dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos conforme (ASTM E1876, 2015). A Figura 61 ilustra a variação dos módulos de elasticidade dinâmica nas diferentes substituições percentuais de resíduo polimérico.

Tabela 42: Valores do módulo de elasticidade dinâmico do CAA com substituição de resíduo polimérico por brita

TRAÇO CAA	Porcentagem de RP	E_d (GPa)	Desvio padrão (GPa)
CAA R	0%	34,1	0,2
CAA 5	5%	33,9	0,2
CAA 10	10%	30,1	0,2
CAA 15	15%	32,5	0,2
CAA 20	20%	14,4	0,1

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

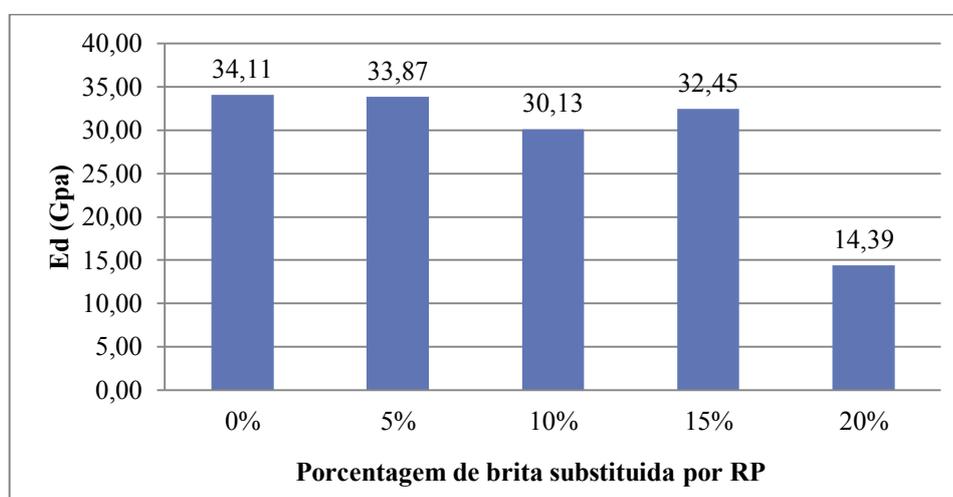


Figura 61: Módulo de elasticidade dinâmico E_d (GPa) com substituição de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

De modo geral, a partir dos resultados apresentados na Tabela 42 e Figura 61 é possível afirmar que o módulo de elasticidade do concreto com substituição de RP por brita é sensivelmente mais baixo que o concreto sem polímero. Ocorre uma grande variação de aproximadamente 58 %, entre o CAA 0 % e o CAA 20 %. Contudo, a redução do módulo não se apresenta inteiramente linear, ficando o CAA 15 % levemente mais elevado que o CAA

10%. O traço CAA 10 %, provavelmente possui menor rigidez que o traço CAA 15 %, devido a maior incorporação de ar do traço CAA 10 % em relação ao traço CAA 15 %. Pode ser confirmado pela análise da Tabela 26 (teor de ar, no estado fresco), CAA 10 % com 6,8 % e CAA 15 % com 5,5 %; e Tabela 39 (índice de vazios, no estado endurecido), CAA 10 % com 4,1 % e CAA 15 % com 3,9 %.

Provavelmente a tendência à redução do módulo de elasticidade do concreto iria continuar com o aumento da substituição de RP por brita. Uma vez que o RP que é um polímero, possui menor rigidez ou dureza que a brita que é um material de origem rochosa mineral. O módulo de elasticidade do concreto com incorporação de partículas menos rígidas, como borracha ou argila expandida, de modo geral é menor se comparado ao concreto convencional em que os agregados são mais rígidos como quartzo, basalto e calcário (HERRERA-SOSA, 2015). As partículas menos rígidas adicionadas no concreto fazem com que a curva tensão-deformação tenha menor inclinação na região elástica, e isso faz com que o produto final tenha menor módulo de elasticidade (HERRERA-SOSA, 2015).

Resultado similar foi encontrado no trabalho de Aliabdo (2012) que realizou uma comparação entre o concreto e CAA convencional e CAA com polímero e pôde constatar que o ultimo teve resultados de módulo de elasticidade dinâmico inferior em ambas às comparações. A redução no módulo de elasticidade do CAA certamente ocorre devido ao baixo módulo de elasticidade do polímero adicionado ao concreto (ALIABDO, 2012).

Como o módulo de elasticidade é a medida da curva tensão-deformação de um material submetido a um esforço. Quanto maior a rigidez de um material, maior será seu módulo e mais inclinada será a curva tensão versus deformação. Materiais frágeis com grande módulo permitem poucas deformações, se comparado com materiais dúcteis, menos rígidos. Quando se adiciona material menos rígido (dúctil) ao concreto, a exemplo da borracha, a curva tensão-deformação é modificada na região elástica, ficando menos inclinada neste trecho e assim diminuindo o módulo do concreto (HERRERA-SOSA, 2015).

4.3.5. Estimativas do módulo de elasticidade estático (E_c)

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático por meio do método de Popovics (2008) que faz uso do módulo de elasticidade dinâmico obtido pela técnica de excitação por impulso (TEI) é mostrado na Tabela 43 e Figura 62.

Tabela 43: Ec a partir do Ed pelo método de Popovics (2008) do CCA com substituição de resíduo polimérico

TRAÇO CAA	Porcentagem de RP	Ec (GPa)	Desvio padrão (GPa)
CAA R	0%	25,9	± 5,4
CAA 5	5%	26,1	± 5,5
CAA 10	10%	22,5	± 4,7
CAA 15	15%	25,7	± 5,7
CAA 20	20%	9,5	± 1,9

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

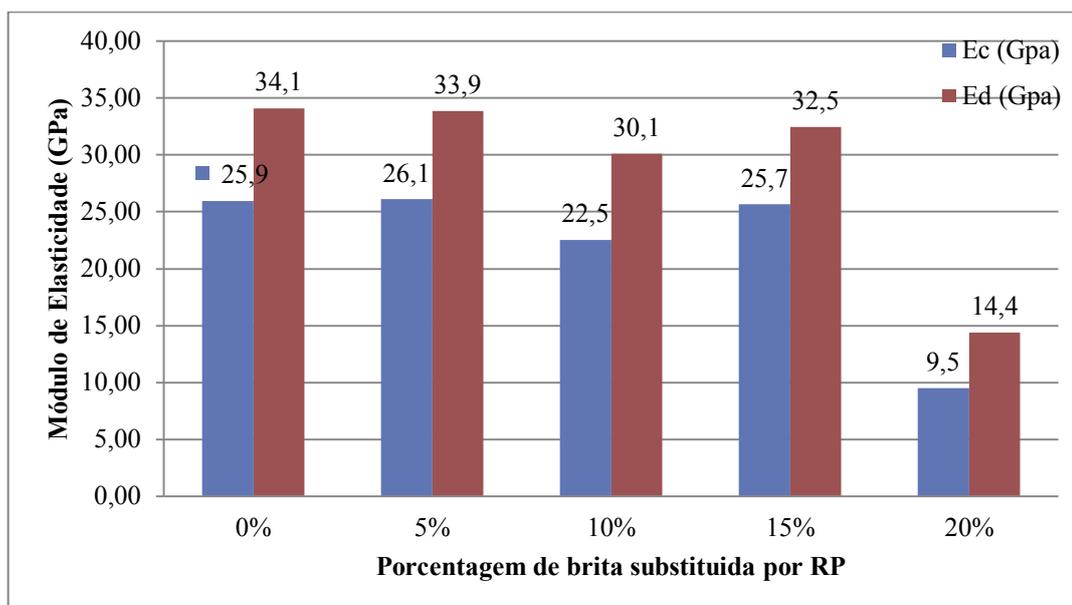


Figura 62: Módulo elasticidade dinâmico (Ed) e módulo elasticidade estático (Ec) pelo método Popovics (2008) do CCA com substituição de resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade dinâmico é superior ao módulo de elasticidade estático. No entanto, essa superioridade é maior para concreto de baixa resistência do que os concretos de alta resistência, essa classificação é realizada com base na ABNT NBR 8953:2015. Em números, pode se dizer que os concretos de baixa resistência possuem módulo de elasticidade dinâmico 40% superior ao estático. Enquanto que esse número é de 30% para os de média resistência e 20% para os de alta resistência.

O comportamento do concreto pode ser entendido como de um material viscoelástico, ou seja, ele varia de acordo com a taxa de deformação aplicada. Quanto menor a taxa de deformação aplicada, mais tempo o material terá para acomodar as tensões e menos inclinada será a curva. Por outro lado, com uma alta taxa de deformação o material não terá tanto tempo para acomodar as tensões e a curva tensão deformação será mais inclinada (SHKOLNIK, 2008; LU, SUN, *et al.*, 2013). Resumindo, quanto maior a taxa de deformação, maior será o módulo de elasticidade. É nisso que reside à diferença do módulo estático e dinâmico, pois, o

módulo dinâmico utiliza-se de uma taxa de deformação superior ao estático, ficando o dinâmico superior ou igual ao estático se comparado ensaios nas mesmas amostras (SHKOLNIK, 2008; LU, SUN, *et al.*, 2013).

4.3.5.1. Módulo de elasticidade estático pela resistência à compressão

Foram calculados os módulos de elasticidade estático pela resistência à compressão axial. Na Tabela 44 são apresentados os valores teóricos obtidos dos módulos de elasticidade estático pela NBR 6118: 2014. Na Figura 63 são apresentados e comparados os valores obtidos para o módulo de elasticidade pelo modelo proposto por Popovics (2008) e pela NBR 6118: 2014. Os valores foram obtidos dos mesmos corpos de prova do CAA com substituição de resíduo e como se trata de dois valores de módulo de elasticidade estático é válida a comparação de ambos.

Tabela 44: Módulo de elasticidade estático pela NBR 6118: 2014 do CAA com resíduo polimérico.

Traço de CAA	Resistência à compressão (MPa) – 28 dias	Mód. Elasticidade estático (GPa)
0%	56,8	42,2
5%	41,1	35,9
10%	38,1	34,6
15%	28,2	29,7
20%	24,7	27,9

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

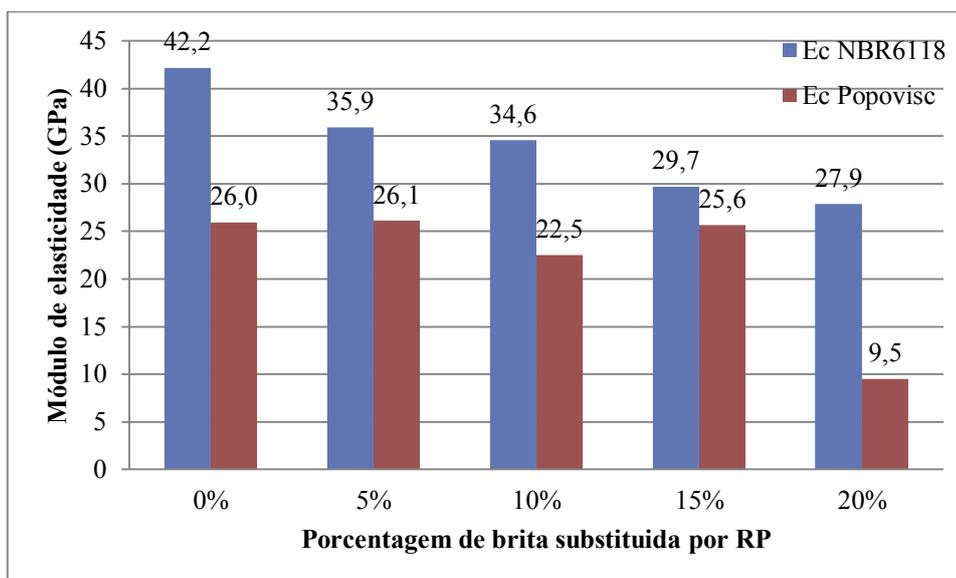


Figura 63: Módulo de elasticidade estático pela NBR 6118:2014 e módulo de elasticidade estático pelo modelo de Popovisc (2008) do CAA com resíduo polimérico PRÓPRIO AUTOR, 2020.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 44 é possível afirmar que ocorre um decréscimo no valor do módulo de elasticidade estático com o acréscimo de resíduo polimérico adicionado no concreto. Comparando as misturas CAA 0% e CAA 20% é encontrado uma variação de 41,5%. Esse comportamento pode ser atribuído a pouca rigidez que o resíduo polimérico apresenta frente ao agregado brita natural. Como está sendo incorporado ao concreto um material menos rígido, e o concreto se tratando de um material compósito é de se esperar que seu módulo de elasticidade diminua.

Na Figura 63 é possível constatar que o módulo de elasticidade obtido pela resistência à compressão ABNT NBR 6118:2014, é maior que o obtido pelo método proposto por Popovisc (2008). Esse acréscimo é encontrado para todas as misturas, em termos de porcentagem é possível afirmar que esse aumento é de 38,5 % para o CAA 0 %, 27,3 % para o CAA 5 %, 34,9 % para o CAA 10 %, 13,6 % para o CAA 15 % e 65,9 % para o CAA 20 %. A mistura CAA 20 % teve a maior variação entre todas as misturas, tudo indica que pela presença de segregação e falta de homogeneidade do traço CAA 20 % que pode ser visto no ensaio de IEV, Tabela 29, contribui para o baixo módulo de elasticidade estático.

4.3.6. Resistividade elétrica do concreto

Na Tabela 45 são fornecidos os valores de resistividade para o concreto, e demais dados, como a corrente elétrica e dimensões da amostra utilizadas para cálculos na execução do ensaio. A Figura 64 ilustra a variação da resistividade elétrica ao longo das adições de RP no concreto.

Tabela 45: Dados utilizados da amostra para cálculo e valores de resistividade elétrica volumétrica do CAA com resíduo polimérico

CAA	Corrente (A) (t=0)	Corrente (A) (t=10min)	Tensão (V)	Área (m ²)	Altura (m)	Resistividade Elétrica (Ω - ohm)
0%	1,30E-02	1,31E-02	50,8	7,85E-03	0,2	153,0
5%	6,26E-03	6,27E-03	50,9	7,85E-03	0,2	319,1
10%	3,66E-03	3,68E-03	50,2	7,85E-03	0,2	537,2
15%	5,26E-03	5,30E-03	50,4	7,85E-03	0,2	374,9
20%	4,62E-03	4,76E-03	50,4	7,85E-03	0,2	422,0

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

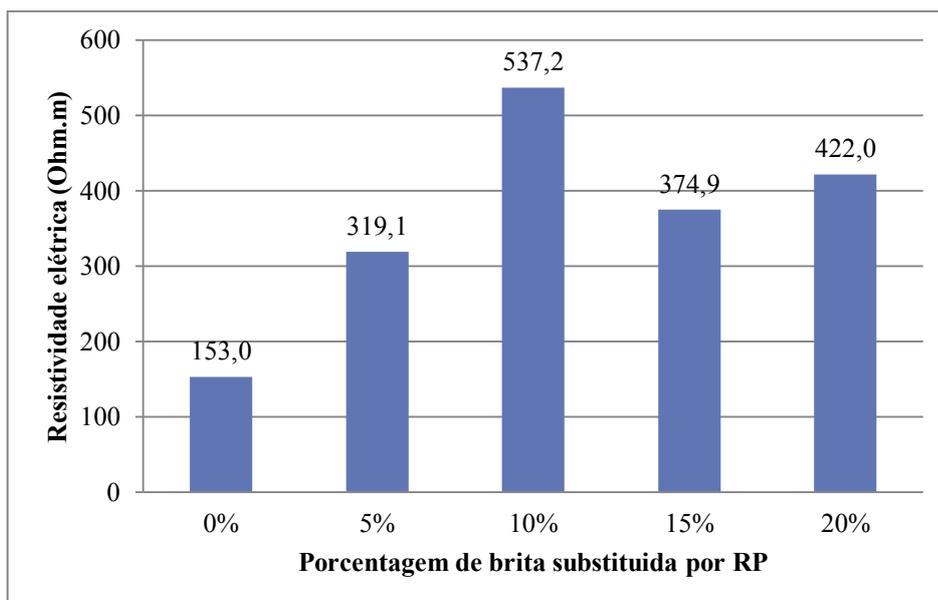


Figura 64: Resistividade elétrica do CAA em função da substituição de brita por resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

A substituição de RP no CAA, como pode ser observada na Tabela 45 e Figura 64, aumentam significativamente os valores de resistividade elétrica. De acordo com Tabela 46, o traço com CAA 0% tem baixa probabilidade de corrosão. Já os traços com CAA 5%, CAA 10%, CAA 15% e CAA 20% de RP tem desprezível probabilidade de corrosão ao longo de sua vida útil. É importante notar que as amostras de 10% obtiveram maiores valores de resistividade, representando um aumento de 40,6% com relação o CAA 5% e ficando superior aos valores encontrados para os traços CAA 15% e CAA 20%, respectivamente. Isso certamente tem relação ao maior teor de ar que esse traço CAA 10% obteve no estado fresco, uma vez que o ar atmosférico possui baixa condutividade elétrica. Conforme mostrado na Tabela 26 e Figura 44, respectivamente. Isso mostra que essa proporção alcança um valor adequado de substituição de RP por brita, em que é obtido um concreto com características autoadensáveis e de elevada resistividade elétrica.

Tabela 46: Probabilidade de corrosão em função da resistividade.

Resistividade do concreto	Indicação da probabilidade de corrosão
> 200 ohm.m	Desprezível
100 a 200 ohm.m	Baixa
50 a 100 ohm.m	Alta
< 50 ohm.m	Muito alta

Fonte: Polder, 2000 apud OTANI e PEREIRA, 2017.

De forma geral, o aumento na resistividade elétrica de um material, representa o aumento na resistência deste material quanto à passagem de corrente elétrica. Com isso, quanto mais isolante for o material, maior será sua resistividade elétrica (VILLATE, 2013). E os resultados encontrados com a substituição de RP por brita proporciona esse aumento na resistividade, pois os polímeros são em sua maioria materiais isolantes, ou seja, possuem alta resistividade elétrica.

4.3.7. Análise microestrutural

Nas Figura 65 a Figura 69 são apresentadas as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todos os traços de concreto deste trabalho. De forma geral é possível identificar a presença de alguns dos principais componentes da pasta de cimento hidratada: zona de transição na interface (ZTI); vazios, poros e fissuras; fase agregado, tanto polímero, quanto os agregados convencionais.

4.3.7.1. Análise das micrografias para CAA com diferentes teores de resíduo polimérico

A Figura 65 mostra o ensaio de MEV do traço CAA 0% ou referência. É possível identificar a presença de poros e a fase agregado convencional (brita). A amostra de CAA 0% alcançou os melhores resultados de resistência mecânica. Possivelmente o fato que contribui em maior escala para esses resultados é a ZTI ter aderido satisfatoriamente ao agregado brita.

Contudo, também foram encontrados poros e vazios que podem comprometer a resistência do concreto, e podem ter impedido que o concreto alcançasse maiores resistências. Além de contribuir eventualmente com a durabilidade em longo prazo, pois o concreto fica mais reativo e suscetível a ataque de agentes químicos como os sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em concretos é comum a presença de uma fina camada de água em torno dos agregados. Agregados esses que são, em geral, pouco porosos a exemplo do basalto e granito (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Esse filme de água contribui para uma elevada relação a/c nesta região que por sua vez leva a formação de partículas de cristais porosos e relativamente grande, como: etringita e monossulfatos que possuem baixa resistência mecânica. Esse filme de água é o resultado da segregação interna da água que não participa do processo de hidratação do cimento, ou seja, água excedente (ALIZADEH, 2011).

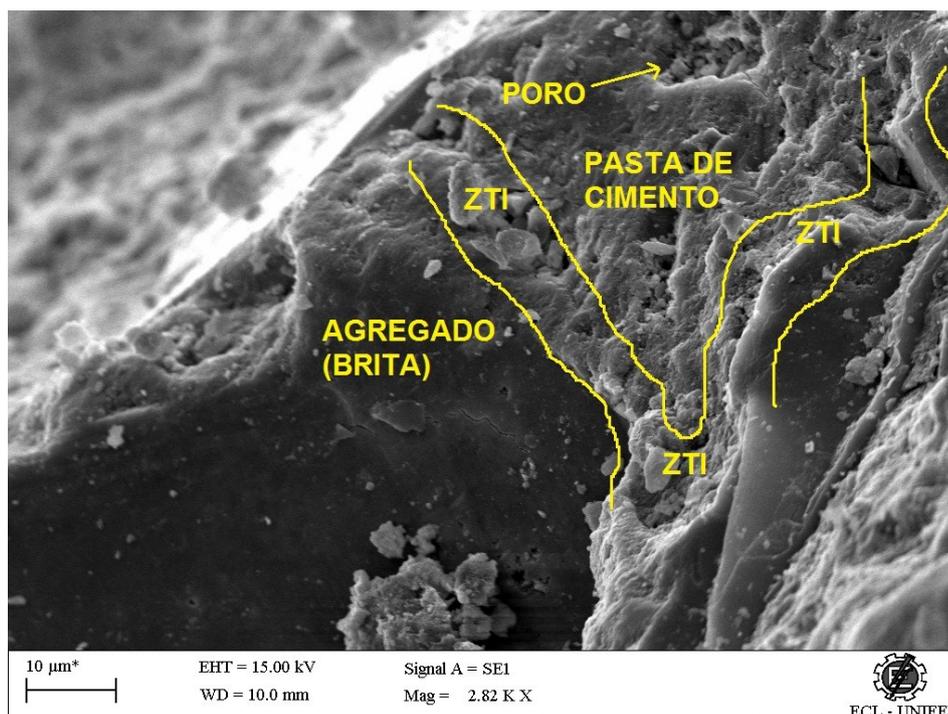


Figura 65: Topografia por MEV ES da amostra do CAA 0% sem resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Nas Figura 66 e Figura 67 são apresentadas as micrografias das amostras CAA 5% e CAA 10%. O resíduo polimérico que pode ser identificado como a fase de superfície relativamente lisa e regular. Pela escala e aumento utilizado, é possível ter uma ampla visão da ZTI. O espaço de vazio no centro da ZTI representa a falta de aderência do agregado polimérico e a pasta de cimento em ambas as micrografias. A presença de vazios juntamente com a falta de aderência é fator que contribui para perda de resistência mecânica.

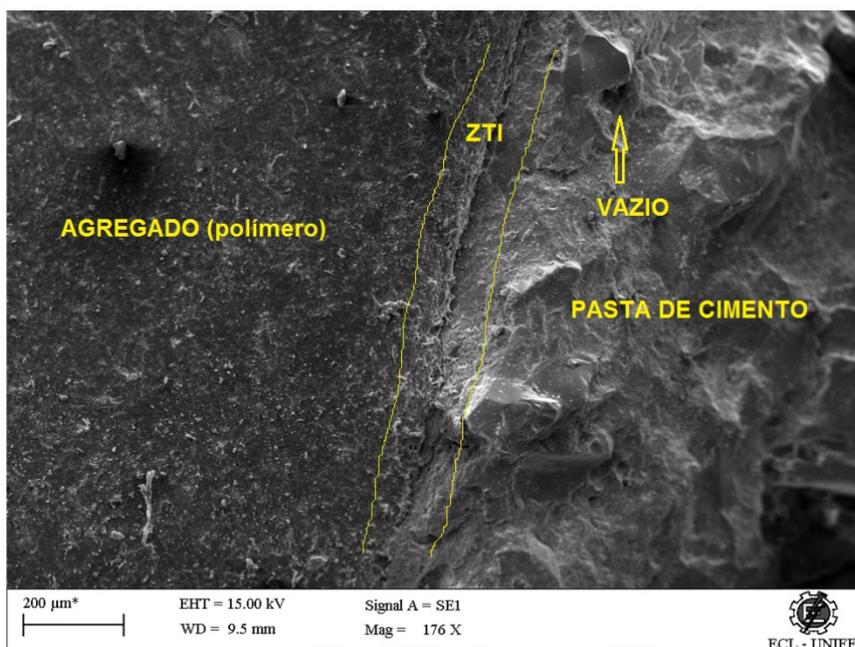


Figura 66: Topografia por MEV ES da amostra CAA 5% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

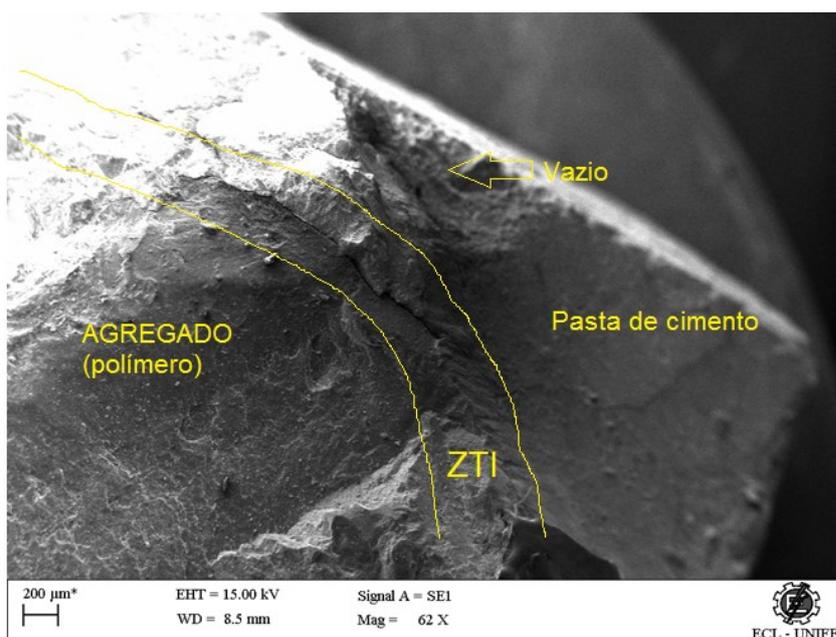


Figura 67: Topografia por MEV ES da amostra CAA 10% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Na Figura 68 e Figura 69 são ilustrados a micrografia da amostra CAA 15% e CAA 20%. Em que é possível analisar suas topografias que se apresentam bastante irregular, com varias regiões de vazios e fissuras. O agregado polimérico nesta região analisada, também possui superfície acidentada com leve rugosidade. Outro ponto importante a ser destacado é a fraca aderência entre pasta de cimento e o polímero, evidenciada pelo vazio ao longo da ZTI,

assim como o aparecimento de fissuras ao longo da pasta de cimento. Esses fatos se somam e contribuem de forma significativa para a perda de resistência mecânica do concreto.

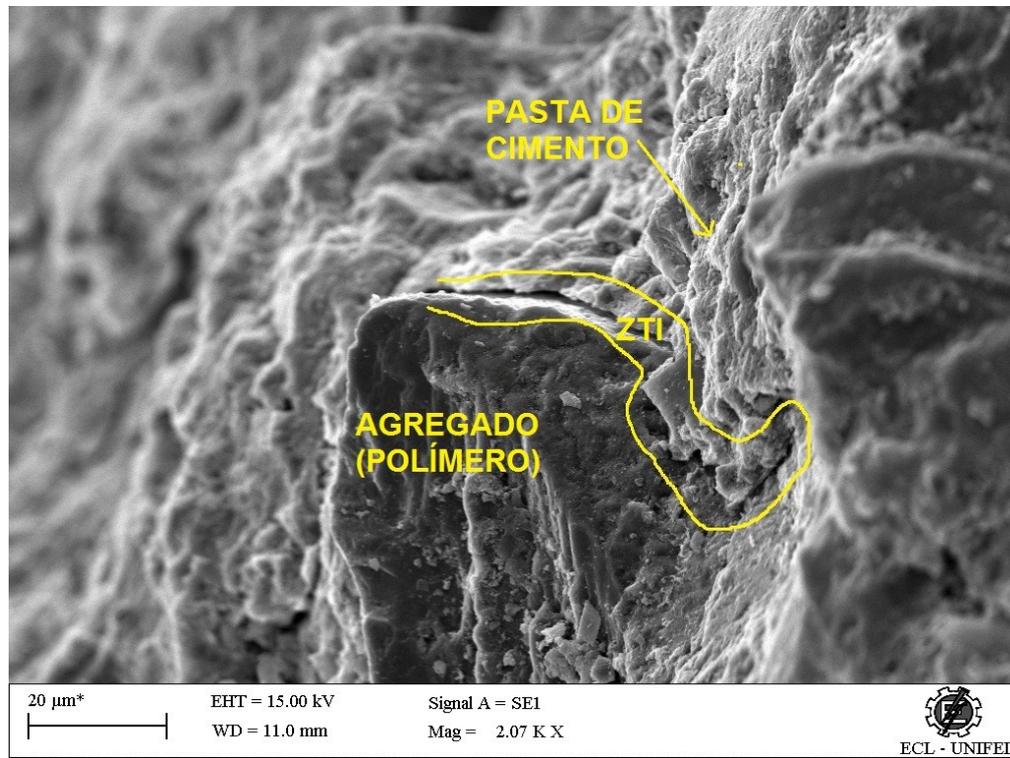


Figura 68: Topografia por MEV ES da amostra CAA 15% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

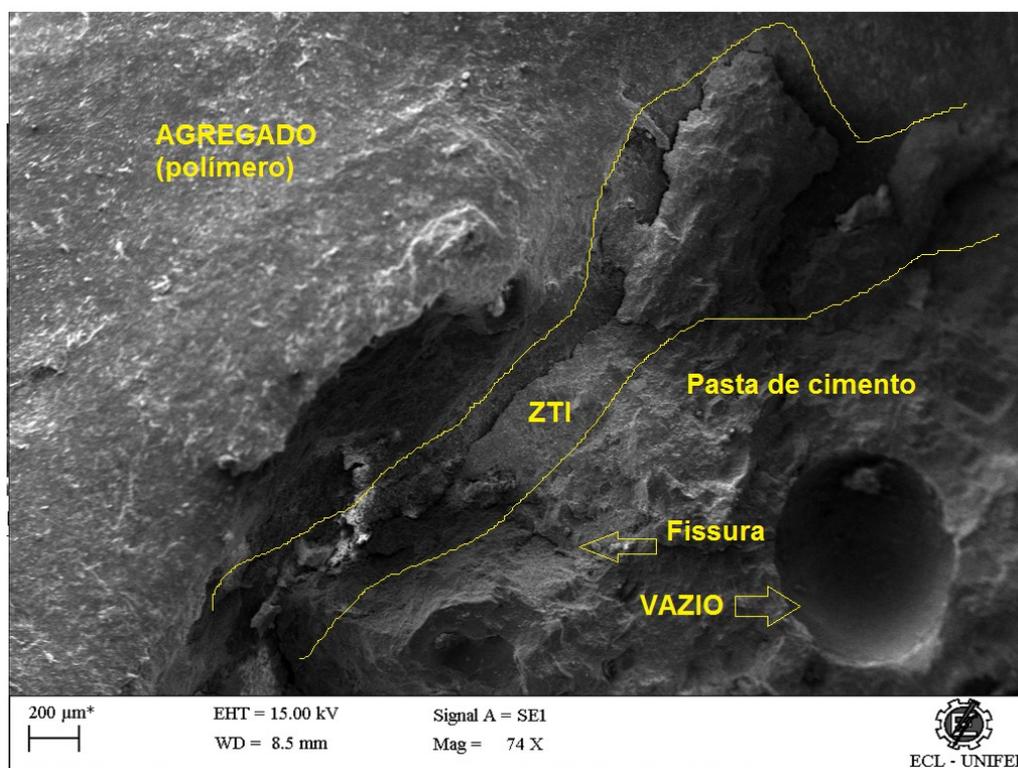


Figura 69: Análise da topografia por MEV ES da amostra CAA 20% com resíduo polimérico (Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020).

De modo geral, no teste de MEV utilizando elétron secundário para as amostras contendo polímero observou-se que em suas topografias que a ZTI entre agregado polimérico e pasta de cimento foi comprometida, pois, não apresenta ligação consistente. Este fato pode ser atribuído à natureza hidrofóbica do polímero que apresenta superfície que não se adere inteiramente a materiais cerâmicos como o cimento portland (COLOM, 2013; THOMAS e GUPTA, 2015). Há diversos pontos com vacâncias significativas, pontos de vazios e saliências que aumentam a porosidade do concreto, comprometendo assim sua resistência mecânica e possivelmente durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os materiais de origem polimérica, tais como: borracha sintética, PVC, EPS, não apresentam uma superfície aderente, como ocorre nos agregados convencionais (calcário, granito, arenito, quartzo). Não ocorrendo um depósito de uma fina camada de água e pasta de cimento sobre os agregados, assim ocorre um comprometimento da ZTI, enfraquecendo o concreto com resíduos poliméricos como um todo (THOMAS e GUPTA, 2015).

Angelin (2018) em sua pesquisa, utilizando CAA modificado com resíduo de pneu e argila expandida pode constatar vários pontos da micrografia a presença de etringita e seu subproduto monossulfato hidratado, em maiores proporções próximos da ZTI, entre agregado polimérico e a pasta de cimento. Ou seja, a presença de resíduos de borracha provavelmente diminui a velocidade de hidratação dos grãos de cimento nestas regiões analisadas. Trazendo para o campo de atuação deste trabalho, pode-se sugerir que situações similares ocorreram próximas a ZTI dos CAA produzidos neste trabalho.

Um comportamento verificado com o aumento da quantidade de resíduos poliméricos, ao longo das misturas, é que a fase matriz da pasta de cimento fica muito porosa e apresenta inúmeros pontos de vazios ou vacâncias. Esse fato pode ser atribuído a bolhas de ar que se aderem na superfície do polímero e são lançadas durante a execução do concreto. Estas bolhas de ar contribuem aumentando a porosidade da pasta de cimento, deixando a matriz cimentícia extremamente fragilizada (EIRAS, 2014).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, depois de uma revisão crítica da literatura e da execução da parte experimental, pode-se concluir que: os métodos utilizados para execução do CAA proposto foram satisfatórios. Uma vez que se propôs produzir CAA utilizando como principal referência o método de Tutikian (2004) que se mostra um método experimental e simples de execução, contudo que demanda certa experiência do operador em executar concretos. Uma das vantagens identificadas neste método foi a premissa de utilizar materiais da localidade, ou seja, materiais disponíveis e de fácil acesso em lojas de materiais para construção.

Com a revisão bibliográfica ficou evidente que o desenvolvimento de concretos aliado a soluções ambientais é uma temática importante no campo da engenharia para o desenvolvimento sustentável urbano. Frente ao número gigantesco de resíduos sólidos gerados diariamente e o consumo desequilibrado de recursos naturais.

Com relação ao atual cenário da pesquisa sobre o tema CAA com resíduo, nacionalmente pode se constatar que há uma maior concentração de polos de pesquisas nas regiões sul (33%) e sudeste (53%) brasileiras. No cenário internacional, pode se constatar que as publicações nos últimos 5 (cinco) anos tiveram maior número no período de 2018 (65) e 2019 (54). As publicações se destacam em maior volume nos países asiáticos, exemplo: Índia, China, Iraque e Irã.

Alinhado a esta problemática, este trabalho de dissertação se propôs produzir concreto autoadensável com resíduo polimérico de refrigeradores que atenda as normas vigentes para concreto autoadensável (ABNT NBR 15823 : 2017) e que este produto seja uma alternativa para o descarte adequado ambientalmente de resíduos poliméricos.

Dentro das hipóteses levantadas de início, quanto ao comportamento do CAA pela substituição de resíduo, esperava-se que com a substituição de resíduo polimérico, o CAA perderia fluidez e ganharia coesão. No entanto, o contrário foi observado pelos resultados dos ensaios executados. Isso certamente pode ser atribuída à baixa massa específica dos resíduos reciclados, bem como ao formato irregular e rugosidade superficial.

Já o parâmetro resistência, apresenta coerência com as referências bibliográfica levantadas de início, pois ocorre diminuição tanto para resistência à compressão axial quanto para resistência à tração.

Os ensaios de módulo de elasticidade mostram coerência com a realidade, pois, como o concreto é um material compósito, suas características físicas, mecânicas e microestruturais advêm dos seus componentes. E com a incorporação de polímero, pode se esperar que o concreto se tornasse menos rígido e isolante. E é exatamente o que os ensaios realizados vêm a comprovar.

O CAA produzido implica em um produto que atende as normas quanto ao estado fresco do concreto. A substituição de resíduo polimérico na forma que foi utilizado neste trabalho, ou seja, em substituição ao agregado graúdo, representa uma alternativa para execução de CAA. É importante destacar que o resíduo polimérico utilizado não apresenta custo financeiro e sua substituição pelos agregados naturais diminui a demanda por fontes de recursos naturais para a produção de concretos. Além de servir como destinação correta para os resíduos. Frente ao grande volume de concreto produzido e grande consumo de recursos naturais pela sociedade moderna, qualquer mudança na composição do concreto, por menor que seja, terá resultados significativos em longo prazo.

6. CONCLUSÕES

Quanto aos objetivos propostos inicialmente pode se afirmar que foi possível obter CAA com resíduo polimérico de refrigeradores substituindo em proporções a brita. E foi possível caracterizar e avaliar suas principais características no estado fresco e endurecido.

No estado fresco a substituição de RP por brita resultou em: diminuição da massa específica fresca, diminuição do consumo de cimento, aumento do teor de ar. Gradual diminuição da viscosidade com aumento de fluidez, diminuição da coesão e diminuição do tempo de escoamento. Também há melhora na habilidade passante do CAA com substituição de RP por brita.

Nos traços de CAA 5% ao CAA 15%, o concreto se manteve estável e homogêneo. Contudo no traço CAA 20%, houve segregação dos agregados com exsudação da água de amassamento para extremidades e concentração dos agregados no centro concreto.

No estado endurecido a substituição de RP por brita resultou em: diminuição da resistência à compressão e tração ao longo das substituições de resíduo. Diminuição da massa específica com aumento da absorção de água e índice de vazios. Diminuição no módulo de elasticidade dinâmico. Com isso, o concreto com resíduo se torna menos rígido, fato que é intuitivo, pois a natureza do resíduo adicionado é pouco rígida.

De forma geral, aumento na resistividade elétrica à medida que aumenta a parcela de polímero na composição do CAA. Ou seja, o concreto se torna um material mais isolante a passagem de corrente elétrica.

Ocorre falta de aderência entre o agregado reciclado e a matriz cimentícia. Também em diversos pontos houve aumento de vazios que contribuem para aumentar a porosidade. Além disso, ocorre gradual surgimento de fissuras ao longo da pasta de cimento.

6.1. Sugestão para trabalhos futuros

A partir das conclusões dessa dissertação e para dar sequência aos avanços em pesquisa nas ciências dos materiais, em especial a tecnologia do concreto. É recomendado que mais pesquisas futuras sejam realizadas sobre esta temática.

- Desenvolver outros traços de concreto autoadensável que permitam a substituição de maior porcentagem resíduo polimérico de refrigeradores. Utilizando para tanto, o mesmo ou outro tipo de adições minerais.
- Modificar os traços de concreto autoadensável desta pesquisa, alterando a porcentagem dos agregados. De modo que se possa adicionar porcentagem maior de resíduo.
- Desenvolver mais tipos de caracterização mecânica, física e microestrutural do CAA desta pesquisa, tanto no estado fresco como endurecido. De modo que possa atribuir características específicas ao material, e assim aumentar as áreas de atuação deste material na construção civil.
- Utilizar outras faixas de granulometrias do resíduo, para que se possa utilizar em substituição a outros agregados, tal como a areia.

7. BIBLIOGRAFIA

ABCP. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland (2018)**. 10a ed. - Totalmente revisado (por Arnaldo Forti Battagin) e atendendo à nova norma de cimento ABNT NBR 16.697. ed. São Paulo/SP: ABCP, 2018. 40 p.

ABCP. A versatilidade do cimento brasileiro. **abcp.org.br**, 2019. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>.

ABINEE. Associação brasileira da Indústria elétrica eletrônica. **abinee.org.br/informac/revista.htm**, 2019. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/revista.htm>>. Acesso em: Janeiro 2020.

ABNT NBR 10004:2004. **Resíduos sólidos - Classificação**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 10005:2004. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 10006:2004. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 10007:2004. **Amostragem de resíduos sólidos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 11174:1990. **Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes - Procedimento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 12235:1992. **Armazenamento de resíduos sólidos perigosos - Procedimento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 12653:2015. **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 15823:2017. **Requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15833:2018. **Manufatura reversa - Aparelhos de refrigeração**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 16156:2013. **Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Requisitos para atividade de manufatura reversa**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 16697:2018. **Cimento Portland - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 12. Esta Norma especifica os requisitos para o recebimento dos cimentos Portland. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados.

ABNT NBR 5739:2018. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 6118:2014. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 7211:2009. **Agregados para concreto - Especificação**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 1:2019.

ABNT NBR 7222:2011. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].

ABNT NBR 8953:2015. **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados.

ABNT NBR 9204:2012. **Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio**. Associação Brasileira de normas técnicas. Rio de Janeiro, p. 12.

ABNT NBR 9778:2005. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 2:2009.

ABNT NBR 9833:2009. **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 1:2009.

ABREU, G. A. **Efeito das Adições Minerais na Resistividade Elétrica de Concretos Convencionais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.l.]. 1998. Dissertação de Mestrado.

ALCÂNTARA, C. D.; ALBUQUERQUE, D. P. D. L. **ANÁLISE DO POTENCIAL DA INDÚSTRIA DA LINHA BRANCA NO CEARÁ**. [S.l.]: [s.n.], 2008. Textos para Discussão do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE).

AL-HADITHI, A. I.; HILAL, N. N. **The Possibility of Enhancing Some Properties of Self-Compacting Concrete by Adding Waste Plastic Fibers**. Dams and Water Resources Engineering Department, College of Engineering, University of Anabr, Ramadi, ANBAR , IRAQ. [S.l.]. 2016.

ALIABDO, A. A. E. **Experimental investigation on the properties of polymer modified SCC**. Faculty of Engineering, Alexandria University, Egypt. [S.l.]. 2012.

ALIZADEH, R. **Cement and Art**, 2011. Disponível em: <<http://www.cementlab.com/cement-art.htm>>. Acesso em: Fevereiro 2019. Ottawa: INSTITUTE FOR RESEARCH IN CONSTRUCTION.

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

AMERICAN-CHEMISTRY. Introduction to Polyurethanes:History. **polyurethane.americanchemistry.com**, 2020. Disponível em: <<https://polyurethane.americanchemistry.com/History/>>. Acesso em: 2020.

ANGELIN, A. F. **Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, termo acústicos e microestruturais do concreto leve autoadensável emborrachado (clae)**. LIMEIRA: [s.n.], 2018. Tese de Doutorado – FT/UNICAMP.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. **Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados.** [S.l.], p. 76 a 94. 2018. (7).

ASLANI, F. **Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules.** [S.l.], p. 553 a 566. 2018. (182).

ASTM C125-19. **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.** West Conshohocken: ASTM International, 2019. www.astm.org.

ASTM C215, I. **Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.** ASTM. [S.l.], p. 7. 2014.

ASTM E1876, I. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.** [S.l.], p. 17. 2015.

AWASTHI A.K., C. F. . D. I. . L. J. . R. P. . T. S. . W. G. . Z. X. . **Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase.** [S.l.], p. 613-614. 2018.

BALDÉ, C. P. The Global E-Waste Monitor 2017. www.ewastemonitor.info, 2017. Acesso em: Dezembro 2018.

BING, C.; NING, L. **Experimental Research on Properties of Fresh and Hardened Rubberized Concrete.** [S.l.]. 2014. Journal of Materials in Civil Engineering.

BOGAS, J. A.; GOMES, A.; PEREIRA, M. F. C. **Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate.** [S.l.], p. 1013 a 1022. 2012. DECivil/ICIST, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal.

BORGES T., M. R. **Relatório do projeto guia para o armazenamento de resíduos industriais em minas gerais.** [S.l.]. 2017. Sistema estadual do meio ambiente –sisema. Secretaria de estado de meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Fundação estadual do meio ambiente.

BORGES, T. M. R. **Relatório do projeto Guia para o armazenamento de resíduos industriais em Minas Gerais.** FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM E FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. [S.l.]. 2017. Belo Horizonte, Janeiro de 2017..

BORIN, L. A.; BAUER, R. J. F.; FIGUEIREDO, A. D. **Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade.** [S.l.], p. 77 a 89. 2012. Construindo, Belo Horizonte.

BORJA, E. V. D. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Natal-RN: [s.n.], 2011. Tese de Doutorado.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos,** Brasília,DF, 2010.

CALLISTER JR, W. D. R. D. G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução.** 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANESSO, F. A. C. **Módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas – PE, p. 941-951. 2008.

CARELI, F. P. L. **Análise de opções de transporte para um sistema de logística reversa de refrigeradores**. [S.l.]: Revista Latino Americano de Inovação e Engenharia de Produção, 2016. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

CNPQ. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **buscatextual.cnpq.br**, 2019. Disponível em: <http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/busca.do?metodo=forwardPaginaResultados®istros=0;10&query=%28%2Bidx_assunto%3A%28concreto%29+%2Bidx_assunto%3A%28auto%29+%2Bidx_assunto%3A%28adensavel%29+%2Bidx_assunto%3A%28or%29+%2Bidx_assunto%3A%28residuo%29+>>. Acesso em: Setembro 2019.

COLOM, X. E. A. **Acoustic and mechanical properties of recycled polyvinyl chloride/ground tyre rubber composites**. [S.l.], p. 1061 a 1069.. 2013. Journal of Composite Materials..

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA**. [S.l.]. 2002. RESOLUÇÃO CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002. Publicada no DOU no 226, de 22 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 85-91.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas de bagaço-de-cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Rio de Janeiro. 2006. Tese (doutorado).

COSTA, J. M. **Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em cimento portland CP IV**. Escola de Engenharia da UFMG. [S.l.]. 2017. Revista CONSTRUINDO, Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., p. 36-46, Jan - Jun.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. [S.l.]. 2005. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Ed. G. C. ISAIA. 1ª ed São Paulo, IBRACON.

DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Constr. Build. Mater**, 2009. 1189–1195.

DAWANDE, B.; JAIN, D.; G. SINGH. Utilization of E-waste as a partial replacement of coarse aggregate in concrete. **IJR**,3(11), pp. 6-9, 2016.

DE MARCHI, R. D. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material**. [S.l.], p. 121. 2011. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.

DEPEC; BRADESCO. **Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos - ELETRODOMÉSTICOS E ELETROELETRÔNICOS**. [S.l.]: [s.n.], 2017.

DIRETIVAEUROPEIA. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). **eur-lex.europa.eu**, 2018. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>>.

DOMONE, P. L. **Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies**. Department of Civil and Environmental Engineering, University College London, London, UK. [S.l.], p. 197 a 208. 2006.

DONADKAR, M. U.; S. S. SOLANKE. Review of E-Waste material used in making of concrete, 2016.

EFNARC. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**, Fevereiro 2002.

EFNARC, 2005. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. [S.l.].

EIRAS, J. N. E. A. **Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires**. [S.l.]. 2014. Materials and Design.

GAMA, N. V.; FERREIRA, A.; TIMMONS, A. B. **Polyurethane Foams: Past, Present, and Future**. [S.l.]: Materials - Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2018.

GARCIA, M. G. **Logística reversa: uma alternativa para reduzir custos e criar valor**. [S.l.]: [s.n.], 2006. XIII SIMPEP.

GESOĞLU, M.; OZBAY, E. , **Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems**. Mater. Struct.. [S.l.], p. 923 a 937. 2007. (40).

GHERNOUTI, **Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC)**. Research Unit: Materials, Processes and Environment, University M'Hamed Bougara of Boumerdes, Algeria. [S.l.]. 2015.

GIRSKAS, ; NAGROCKIENE, **Crushed rubber waste impact of concrete basic properties**. Scientific Institute of Thermal Insulation, Laboratory of Building Products Technology, Linkmenuz str. 28, LT-08217 Vilnius, Lithuania and Department of Building Materials, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Sauletekio. [S.l.]. 2017.

GRUPO Tecnosil. **www.tecnosilbr.com.br**, 2018. Disponível em: <<https://www.tecnosilbr.com.br/aditivos-para-concreto/produtos-aditivos-para-concreto/>>. Acesso em: julho 2019.

GUNEYISI, E. Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash, p. 1037 a 1048, 2010. ISSN 43.

GÜNEYISI, E. et al. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended. **Construction and Building Materials**, 2015. 29 a 44. Disponível em: <<http://abree.org.br/entenda-o-descarte/>>. Acesso em: julho 2019.

HAACH, V. G. **Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars**. NDT&E International. [S.l.], p. 18 a 24. 2013. v.59.

HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física: Eletromagnetismo**. [S.l.]. 2010. Editora LTC, 4ª edição. Rio de Janeiro.

HAMA , S. M.; HILAL, N. N. **Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand**. College of Engineering, University of Anbar, Iraq. [S.l.]. 2017.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo. 1992. Método para concreto convencional IPT/EPSUP.

HERRERA-SOSA, E. S. E. A. **Recovery and Modification of Waste Tire Particles and Their Use as Reinforcements of Concrete.** [S.l.]. 2015. International Journal of Polymer Science, v. 2015, n. 1.

HUBERTO VÁ, M. **Durability of lightweight expanded clay aggregate concrete.** Concrete and Concrete Structures Conference. [S.l.], p. 2 a 6. 2013.

INDUSTRIAFOX. produtos-e-servicos#logistica_reversa. **industriafox.com.br**, 2010. Disponível em: <http://www.industriafox.com/#visao_empreendedora>. Acesso em: Dezembro 2018.

INDUSTRIAFOX.COM. **industriafox**, 2019. Disponível em: <<http://www.industriafox.com>>. Acesso em: Janeiro 2019.

IPEA. Instituto de pesquisa econômica aplicada. **ipea.gov.br**, 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296:apenas-13-dos-residuos-urbanos-no-pais-vaio-para-reciclagem&catid=1:dirur&directory=1>. Acesso em: Janeiro 2019.

J. KANADASAN, H. A. R. **Engineering and sustainability performance of self-compacting palm oil mill incinerated waste concrete.** Journal of Cleaner Production 89. [S.l.]. 2015.

JALAL, M. et al. **Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles.** Materials and Design. [S.l.], p. 389 a 400. 2012.

KARAHAN, O. E. A. **Fresh, Mechanical, Transport and Durability Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete.** [S.l.]. 2013. ACI Materials Journal, v. 109.

KOSSAKA, J. **Método de reciclagem de espuma rígida de poliuretano de refrigeradores e congeladores de uso domésticos.** [S.l.]: [s.n.], 2004. Universidade Federal de Paraná / Curitiba. Dissertação - Mestrado em engenharia de materiais e processos.

KUMAR, D. K.; S., K. A.; BALARAMAN, R. Study on properties of concrete with electronic waste. **Internacional Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**, 2017. pp.520-537.

KUMAYAMA,. **Estudo da viabilidade do emprego de pó de mármore para produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (eps).** Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira (FEIS-UNESP). [S.l.]. 2015. Revista Eletrônica de Engenharia Civil.

KWASNY, J. E. A. **Influence of the Type of Coarse Lightweight Aggregate on Properties of Semi-Lightweight Self-Consolidating Concrete.** [S.l.]. 2012. Journal of Materials in Civil Engineering, December, p. 455..

LAMOUNIER, A. S. DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E DA POROSIDADE ABERTA DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS DE ENGENHARIA. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Cuiabá-MT, 2014.

LU, X. et al. **Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method.** [S.l.]: [s.n.], 2013. 231 a 239 p. Construction and Building Materials, v. 47.

MANJUNATH, A. B. T. Partial replacement of E-Plastic Waste as coarse aggregate in concrete. **Internacional Conference on Soil Waste Management**, 2015.

MANUEL, P. Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis. **Dissertação de mestrado, UFRGS**, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, C. A.; JANNUZZI, G. M. **O estoque de refrigeradores no Brasil: Diferenças e semelhanças regionais por faixa de renda**. [S.l.]: Espaço energia, Número 08., 2008. ISSN: 1807 - 8575.

MMA. cidades-sustentaveis/residuos-solidos/catadores-de-materiais-reciclaveis/reciclagem-e-reaproveitamento. **mma.gov.br**, 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/catadores-de-materiais-reciclaveis/reciclagem-e-reaproveitamento>>. Acesso em: Dezembro 2019.

MOHAMMEDA, A. A. **Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets**. Civil Engineering Dept., College of Engineering, University of Sulaimani, Sulaimani, Iraq and Civil Engineering Dept., Ishik University-Sulaimani, Sulaimani, Iraq. [S.l.]. 2019.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. [S.l.]: England: Pearson, 2011.

OKAMURA, H.; OUCHI. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. n. 1, 2003. p. 5–15.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Estimativa do módulo de elasticidade estático de utilizando a Técnica de Excitação por Impulso**. ATCP Engenharia Física. [S.l.], p. 38. 2017. Informativo técnico-científico ITC-07 / ATCP DOI: 10.13140 / RG.2.1.4995.3124.

PACHECO, J. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. In: **Congresso Brasileiro do Concreto, 56º**. IBRACON. Natal - RN. 2014. Anais.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construções. IBRACON Instituto Brasileiro do concreto**, 2009. ISSN Ano XXXVII; Nº 53.

PERS. **Política Estadual de Resíduos Sólidos**. [S.l.]. 2009. Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Publicação – Diário do Executivo – “Minas Gerais” - 13/01/2009).

PESSOA FILHO, N.; COSTA, J. A. F. **Logística Reversa: Pós consumo. Resíduo sólido da linha branca e seu destino final no município de Natal/RN**. [S.l.]: Revista científica da faculdade de Natal - FAL., 2014.

PNRS. Política Nacional de Resíduos Sólidos., 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/19322>>. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

POPOVICS, J. S. **A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete**. University of Illinois, Urbana, IL. [S.l.]. 2008. ACI-CRC Final Report.

R. MADANDOUST, S. Y. M. **Fresh and hardened properties of selfcompacting concrete containing metakaolin**. *Construct. Build. Mater.*. [S.l.], p. 752 a 760. 2012. (35).

RAHMAN, M. M. **Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)**. [S.l.]. 2012. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 630–637.

RATHORE, V.; RAWAT, A. Effective utilization of electronic waste in concrete mixture as a partial replacement to coarse aggregates. **Proceedings of the International Conference on sustainable materials and structures for civil infrastructures**, 2019.

RAUT, S. R.; DHAPUDKAR, R. S.; MANDAOKAR, M. G. Experimental study on utilization of E-Waste in Cement Concrete. **International Journal of engineering and science (IJES)**, 2018. 88-86.

REPETTE, W. L. **Implementação do concreto auto-adensável na execução de estrutura de concreto armado**. [S.l.]. 2005. In: *Comunidade da Construção Florianópolis*.

REPETTE, W. L. **Concreto auto-adensável: características e aplicações**. São Paulo. 2008. *Revista Techne*. Edição 135. Editora Pini.

RILEM. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. **rilem.net**, 2019. Disponível em: <<https://www.rilem.net/agenda/9th-international-rilem-symposium-on-self-compacting-concrete-scc9-2nd-international-rilem-conference-on-rheology-and-processing-of-construction-materials-rheocon2-1091>>. Acesso em: fevereiro 2019.

RIPPER, E. **Manual prático de materiais de construção**. São Paulo: Pini, 1995. 253p. São Paulo: PINI, 1995. 245p.

ROBINSON, B. H. **E-waste: An assessment of global production and enviromental impacts**. [S.l.]: [s.n.], 2009. *Sic Total Environ*, Philadelphia. vol:408.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo. São Carlos (SP). 2003. Tese de doutorado.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: PINI, 2009.

RUIZHE SI, J. W. S. G. Q. D. S. H. **Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber**. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, 1400 Townsend Dr., Houghton, MI 49931-1295, USA. [S.l.]. 2018.

RWAMAMARA, R. . S. P. **Self-compacting concrete use for construction work environment sustainability**. *J. Civ. Eng. Manag.* 18, 724e734. [S.l.]. 2012.

SADRMOMTAZI, A. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self selfcompacting. **Journal of Cleaner Production** , 2016. 2363 a 2373.

SAINZ-AJA, J. et al. **Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

SANTOS, S. P. A.; SILVA, A. S. R. **Propriedades reológicas do concreto autoadensável no estado fresco**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

SARAIVA, A. L. **CMARSc - Subcomissão Temporária de Resíduos Sólidos 4ª Reunião**. [S.l.]: [s.n.], 2012. ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.

SCOPUS. www2.scopus.com. SCOPUS, 2019. Disponível em: <<https://www2.scopus.com/results/results.uri?numberOfFields=0&src=s&clickedLink=&edit=t&editSaveSearch=&origin=searchbasic&authorTab=&affiliationTab=&advancedTab=&scient=1&menu=search&tablin=&searchterm1=%28self%2%A0%2%A0AND%2%A0%2%A0compacting%2%A0%2>>. Acesso em: Setembro 2019.

SHKOLNIK, I. E. Influence of high strain rates on stress–strain relationship, strength and elastic modulus of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. v. 30, p. pp. 1000-1012, 2008.

SIDDIQUE, R. **Waste materials and by-products in concrete**. [S.l.], p. 413. 2008.

SILVA, F. M. E. A. **Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber**. [S.l.]. 2015. Construction and Building Materials.

SILVA, F. M. S. **gestão de resíduos eletroeletrônicos**: proposta para implementação de sistema de logística reversa de refrigeradores no Brasil. [S.l.]: [s.n.], 2009. II seminário nordestino sobre resíduos sólidos - redisa. Barranquilla, Colombia.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. [S.l.]. 2016. Trabalho final de curso de graduação. Goiânia - GO.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FRGS. [S.l.]. 2003.

THOMAS, ; GUPTA, R. C. **Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber**. Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, Rajasthan, India. [S.l.]. 2015.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto adensáveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004. Dissertação (Mestrado).

TUTIKIAN, B. F. **Concreto auto-adensável**. 1ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Avaliação de concreto auto adensáveis dosados pelo método Tutikian incorporando resíduos de serragem de mármore e granito**. Rio de Janeiro. 2006. 48º Congresso Brasileiro de Concreto.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. [S.l.]. 2015. 2ª Edição ed. São Paulo: Editora Pini.

UTAMA, N. A. et al. **Embodied impacts of traditional clay versus modern concrete houses in a tropical regime**. Building and Environment. [S.l.], p. 362 a 369. 2012.

VENZON et al. **Resíduos sólidos industriais e seu potencial para a produção de compósitos - uma revisão de literatura**. [S.l.]. 2018. Departamento de engenharia química. Centro de ciências tecnológicas. Universidade Regional de Blumenau/FURB.

VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro : Vilar Consultoria, v. 3a Ed., 2004.

VILLATE, J. E. **Eletricidade e Magnetismo**. Porto: [s.n.], 2013. 221 p.

VOTORANTIMCIMENTOS. **www.votorantimcimentos.com.br**, 2017. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/obras-especiais-industrial-meios-agressivos/>>. Acesso em: julho 2019.

WILLIAN D. CALLISTER, J. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. V. ed. Rio de Janeiro, Jr.: LTC Editora, 2002.

XAVIER, B. C. **Comparação do concreto autoadensável com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito com o concreto autoadensável convencional**. Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de tecnologia - UNICAMP. Limeira. 2019.

XAVIER, L. H. et al. **Manual para a destinação de resíduos eletroeletrônicos no estado Rio de Janeiro**. Cetem. Rio de Janeiro. 2018. (2ª Edição).

YUNG, W. H. **A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete**. [S.l.]: Construction and Building Materials, v. 41, 2013. 665 a 672 p. v. 41.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. Cem. Concr. Res. **Permeation properties of selfcompacting concrete**, 2003. 921 a 926.

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DE CAA

Após ter passado pela etapa (a) - Escolha dos materiais, é possível executar a etapa (b), determinação do teor de argamassa (assunto discutido no 3.2 Método de dosagem e produção dos traços).

Até esta etapa, o concreto ainda era do tipo concreto convencional (CCV). A partir desta etapa, o concreto passa a se transformar em CAA. Para tanto, a Tabela 47 foi utilizada para auxiliar nesta etapa experimental.

Tabela 47: Determinação do teor de argamassa ideal para concreto convencional

Traço rico 1 : 3			Consumo total de materiais (kg)	Consumo de água para alcançar o abatimento (kg)	a/c					
Abatimento desejado = 12 a 15 cm										
Teor de argamassa	Traço unitário (em massa)					Acréscimo em relação ao alfa anterior (kg)				
	Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia					
0,50	1,00	1,00	2,00	5,00	5,00	10,00	0,00	0,00	2,70	0,54
0,53	1,00	1,12	1,88	5,32	5,96	10,00	0,32	0,96	2,85	0,54
0,56	1,00	1,24	1,76	5,68	7,05	10,00	0,36	1,09	3,00	0,53
0,59	1,00	1,36	1,64	6,10	8,29	10,00	0,42	1,25	3,30	0,54
0,62	1,00	1,48	1,52	6,58	9,74	10,00	0,48	1,44	3,45	0,52
0,65	1,00	1,60	1,40	7,14	11,43	10,00	0,56	1,69	3,65	0,51

Fonte: Adaptado de HELENE E TERZIAN, 1992.

Esta etapa experimental foi iniciada com teor de argamassa de 0,50 e traço 1:3, valores tirados como referência do trabalho de (TUTIKIAN, 2004). À medida que o teor de argamassa é aumentado, os agregados cimento e areia também são adicionados, mantendo a brita constante. O controle do conteúdo de água se faz necessário para manter o abatimento na faixa almejada de 9 a 13 cm, medido pela realização de ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998), a cada aumento de teor de argamassa. Foi escolhida esta faixa de abatimento, pois, inicialmente acreditava-se que a adição do RP iria diminuir a fluidez (espalhamento) do concreto, já que o resíduo a ser adicionado tem superfície rugosa e irregular, então buscou se executar um concreto convencional do tipo muito fluido, ver classificação na Tabela 48. No entanto, o contrário foi observado nos ensaios de abatimento do tronco de cone, ver item 4.2.2, com a adição do RP.

Na Tabela 48 é mostrado os valores de consistência/abatimento versus tipo de serviço/obra.

Tabela 48: Limite de abatimento no Slump-test

Limite de abatimento no Slump-test (adaptado de RIPPER, 1995)			
Tipo de obra/serviço	Consistência	Concreto com controle razoável (agregado medidos em volume) e vibração manual ou mecânica	
		Mínimo (cm)	Máximo (cm)
Fundações e muros não armados	Firme	2	6
Fundações e muros armados	Firme e plástico	3	7
Estruturas usuais e lastros	Plástico	4	7
Peças com alta densidade de armadura	Plástico a fluído	7	9
Concreto aparente	Plástico a fluído	6	8
Concreto bombeado a alturas até 40 m	Fluído	8	10
Concreto bombeado a alturas > 40 m	Muito fluído	9	13

Fonte: Adaptado de RIPPER, 1995.

A partir dos dados contidos na Tabela 48 é possível constatar que os valores de consistência dotados inicialmente caracterizam o concreto como muito fluído e recomendado para serviço que envolva concreto bombeado a alturas acima de 40 m.

Fixou-se o valor de 65% de teor de argamassa para todos os CAA. Podendo os traços dos concretos ser caracterizados como sendo de mesma família. Esse valor de teor de argamassa ficou fixado devido a menor relação água-cimento encontrado. E não foram realizados aumentos no teor de argamassa, acima de 65 %, pois como recomenda Manuel, (2005) valores de argamassa acima deste valor podem comprometer propriedades mecânicas do concreto, tais como o módulo de elasticidade, ver Figura 5: Módulo de elasticidade de CAA e CCV em função do teor de argamassa (Fonte: MANUEL, 2005).

Para a etapa (c), determinação dos traços rico, intermediário e pobre, inicialmente foram escolhidos três traços de referência. O traço rico 1:3, intermediário 1:4 e pobre 1:5, os quais foram submetidos aos mesmos procedimentos da etapa (b). Realizados ensaios de

determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998), no estado fresco. E no estado endurecido, ensaios de resistência à compressão longitudinal (axial) aos 28 dias, segundo a ABNT NBR 5739:2018. Os resultados são mostrados Tabela 49.

Tabela 49: Traços rico, intermediário e pobre com abatimento e resistência alcançados.

TRAÇO	Slump flow test (cm)	Resistência compressão (MPa)
Rico - 1:3	10 a 12	28
Intermediário - 1:4	9 a 10	22
Pobre - 1:5	5 a 7	15

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Foi escolhido o traço 1:3 para dar sequência aos experimentos. Pois, para ser concreto estrutural, a resistência à compressão tem que ser igual ou maior que 20 MPa aos 28 dias, ABNT NBR 6118: 2014. E esse traço fornece uma resistência bem acima dos 20 MPa requeridos, uma vez que é desejado que o concreto produzido seja classificado como estrutural.

Na (d), colocação do aditivo foi fixado com base na literatura o fator a/c em 0,45 valor que fica dentro da faixa de variação de 0,26 a 0,48 que frequentemente é usado em CAA (DOMONE, 2006). Manteve-se o traço unitário em massa obtido na etapa (c) e o traço 1:3, com teor de argamassa de 0,65 foi então adicionado o superplastificante (SP) até 1,5% da massa de cimento. Com esse teor de SP, o concreto ganha fluidez e segrega. A correção desta segregação ocorrerá na etapa (e) que ocorre de maneira simultânea a etapa (d). A Tabela 50 mostra como foram realizadas as adições de SP e sílica ativa (finos). Para cada adição de sílica ativa (SA) foi realizado teste de espalhamento até que se obtivesse um traço com consistência adequada, ou seja, homogêneo e trabalhável, segundo os parâmetros fixados para CAA a partir da ABNT NBR 15823:2017.

Tabela 50: Adição do agregado fino e aditivo superplastificante para a determinação de traço referência.

TRAÇO UNITARIO (em massa)							
Traços	Etapa	Cimento	Sílica	Areia	Brita	SP	a/c
1	4 ^a	1,00	0,00	1,60	1,40	0,50%	0,45
2	4 ^a	1,00	0,00	1,60	1,40	1,00%	0,45
3	4 ^a	1,00	0,00	1,60	1,40	1,25%	0,45
4	4 ^a	1,00	0,00	1,60	1,40	1,50%	0,45
5	5 ^a	1,00	0,02	1,60	1,40	1,50%	0,45
6	5 ^a	1,00	0,04	1,60	1,40	1,50%	0,45
7	5 ^a	1,00	0,06	1,60	1,40	1,50%	0,45
8	5 ^a	1,00	0,08	1,60	1,40	1,50%	0,45
9	5^a	1,00	0,10	1,60	1,40	1,50%	0,45

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2020.

Como mostra em negrito na Tabela 50, o Traço 9 foi escolhido para substituição de resíduo polimérico. Sabendo que essa adição será administrada a partir de substituições do agregado graúdo (brita zero) na 2^o etapa do procedimento experimental desta pesquisa.