

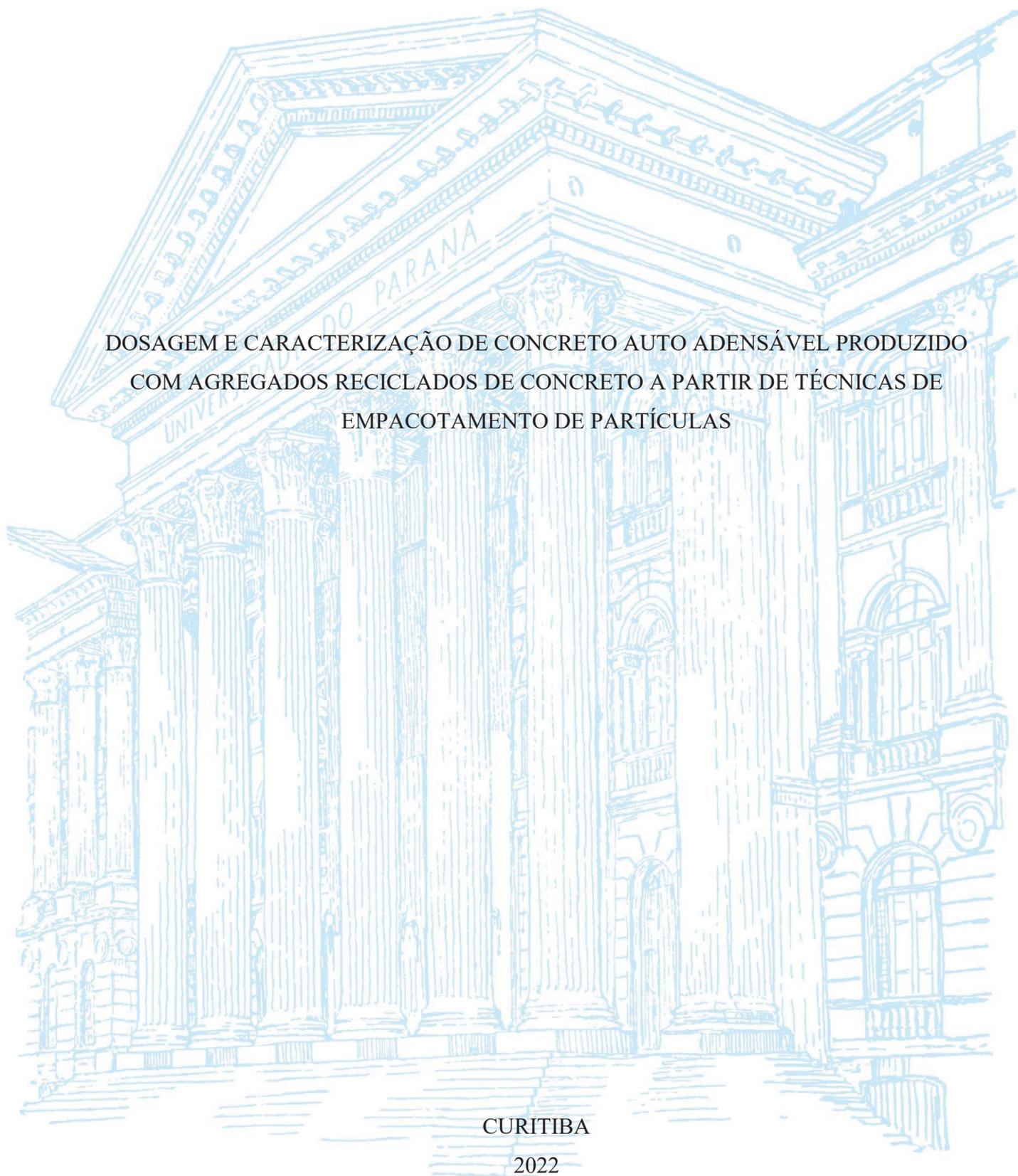
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICOLAS SOARES DO NASCIMENTO

DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO
COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO A PARTIR DE TÉCNICAS DE
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

CURITIBA

2022



NICOLAS SOARES DO NASCIMENTO

DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO
COM AGREGADOS RECICLADOS A PARTIR DE TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO
DE PARTÍCULAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Nayara Soares Klein

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Nascimento, Nicolas Soares do

Dosagem e caracterização de concreto auto adensável produzido com agregados reciclados a partir de técnicas de empacotamento de partículas. / Nicolas Soares do Nascimento. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nayara Soares Klein

1. Concreto (Autoadensável). I. Klein, Nayara Soares. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NICOLAS SOARES DO NASCIMENTO** intitulada: **DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO A PARTIR DE TÉCNICAS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**, sob orientação da Profa. Dra. NAYARA SOARES KLEIN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 01 de Setembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

01/09/2022 16:44:43.0

NAYARA SOARES KLEIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/09/2022 19:56:58.0

HELOISA FUGANTI CAMPOS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

05/09/2022 09:09:56.0

MÔNICA BATISTA LEITE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por me capacitar mentalmente e fisicamente para realizar esse trabalho, por me dar força diante das dificuldades e me tornar perseverante.

À minha mãe pelos valiosos ensinamentos passados ao longo da minha vida, por todo suporte e investimento na minha formação educacional e pelas palavras de incentivo durante toda essa jornada.

À Bárbara, pela parceria e companheirismo na vida acadêmica e pessoal, por viver cada momento dessa jornada comigo, por várias vezes ter me dado suporte emocional e por ter me ajudado a ser quem eu sou hoje. Sem você eu não teria conseguido.

Ao Luis e à Tânia por todo apoio prestado, pelos sábios conselhos, pelo acolhimento e pelo encorajamento.

Aos meus amigos, pela torcida, pela paciência e amparo nas horas de desabafo e pelos inúmeros momentos de diversão e risadas.

À professora Nayara por ter aceitado conduzir essa pesquisa, pela contribuição no desenvolvimento do trabalho e pela compreensão e paciência nos momentos em que falhei.

Ao meu querido professor e amigo Jorge Cunha, pelo conhecimento transmitido ao longo de vários anos como meu professor e gestor de trabalho.

À Votorantim Cimentos pela doação do cimento e das adições usadas no desenvolvimento experimental dessa pesquisa.

À MC-Bauchemie pela doação do aditivo superplastificante usado na dosagem dos traços.

À equipe do Lactec pelo auxílio na execução de ensaios de resistência dos concretos.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton.

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é uma das tecnologias mais inovadoras do setor da construção civil nas últimas décadas e vem ganhando destaque no mercado por conferir diversas vantagens técnicas e econômicas. Em um cenário oposto, a construção civil é geradora de grandes impactos ambientais negativos e dentre as preocupações mais emergentes, duas são a de reduzir a extração de recursos naturais usados como agregados na produção de concretos e promover destinações mais adequadas aos resíduos de construção e demolição (RCD). Uma das alternativas visadas para mitigar esses impactos é a produção de concretos usando agregados obtidos a partir de resíduos de demolição de concreto (ARC) em substituição aos agregados naturais (AN). Seguindo essa abordagem, o objetivo do presente trabalho é empregar os conceitos de empacotamento de partículas para obter dosagens otimizadas de CAA contendo ARC. Para tanto, foi adotado o modelo de Alfred, que propõe uma curva granulométrica ideal a fim de promover o empacotamento do conjunto de partículas. Para aplicação do modelo foi programado um código em *Python* com a função de simular diversas combinações de proporções entre os materiais componentes e retornar a que melhor se ajusta à curva teórica ideal. Das diversas combinações retornadas pelo código, foram selecionadas três composições de CAA para constituir a fase experimental do estudo: CAA-1, CAA-2 e CAA-3. O CAA-1 foi composto por 100% de brita reciclada e 50,4% de areia reciclada em substituição à areia natural. O CAA-2 com 100% de brita reciclada e 100% de areia natural e o CAA-3 com 100% de areia reciclada e 100% de brita natural. Os três concretos foram produzidos e caracterizados no estado fresco pelos ensaios de *slump-flow*, anel J, funil V e massa específica. No estado endurecido foram avaliados quanto à resistência mecânica e quanto às propriedades de absorção de água. Além disso, também investigados através de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS). A aplicação do modelo de Alfred permitiu a obtenção de dosagens otimizadas, com substituição dos AN por ARC em taxas de 100% e consumo de cimento variando de 236 a 309 kg/m³. As misturas demonstraram comportamento satisfatório quanto à fluidez e coesão no estado fresco, atendendo os requisitos normativos de autoadensabilidade. Apesar do baixo consumo de cimento dos traços, a taxa de consumo de aglomerantes em relação a resistências à compressão dos concretos, conhecido como fator *Binder Index* (BI) foi elevada, variando de 12,0 a 19,8 kg/m³ .MPa. No estado endurecido o CAA-2 apresentou melhor desempenho em todas as propriedades mecânicas e de absorção avaliadas. De modo geral, os resultados obtidos demonstraram maior dificuldade na obtenção de propriedades adequadas de autoadensabilidade e mecânicas para os concretos produzidos com uso misto de brita e areia recicladas (CAA-1) e com substituição total de areia natural por areia reciclada (CAA-3).

Palavras-chaves: concreto autoadensável; agregados reciclados de concreto; empacotamento de partículas.

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is one of the most innovative technologies in the civil construction field at the last two decades and it has become popular in the market due to the several technical and economic advantages. In an opposite scenario, civil construction generates major negative environmental impacts and among the most emerging concerns, one is to reduce the extraction of natural resources used as aggregates in concrete production and other one is to promote more adequate destinations for construction and demolition wastes. One of the alternatives aimed at mitigating these impacts is the production of concrete using aggregates obtained from concrete demolition waste (RCA) to replace natural aggregates (NA). Following this approach, the present work aims to apply the concepts of particle packing in order to obtain optimized mix designs of SCC containing RCA. For that, Alfred's model was adopted, which proposes an ideal granulometric curve in order to promote the packing of the set of particles. To apply the model, a Python code was programmed with the function of simulating different combinations of proportions between the component materials and returning the one that best fits the ideal theoretical curve. Among the combinations returned by the code, three compositions of CAA were selected to constitute the experimental phase of the study: CAA-1, CAA-2 and CAA-3. CAA-1 was composed with 100% of recycled gravel and 50.4% of recycled sand in replacement of natural sand. CAA-2 was composed with 100% of recycled gravel and 100% of natural sand. CAA-3 was composed with 100% of recycled sand and 100% of natural gravel. The three concretes were produced and characterized in the fresh state through the following tests: slump-flow, J-ring, V-funnel and specific mass. In the hardened state, they were evaluated regarding its mechanical strength and water absorption. They were also investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The mixtures showed satisfactory results in terms of fluidity and cohesion in the fresh state, meeting the Brazilian standards requirements of self-compacting ability. Despite the low cement consumption of the compositions, the rate of binder consumption in relation to the compressive strength of the concrete, known as the Binder Index (BI) factor, was high compared to other values found in the literature, ranging from 12.0 to 19.8 kg/m³ .MPa. In the hardened state, CAA-2 showed better performance in all mechanical and absorption properties evaluated. In general, the results obtained showed greater difficulty in obtaining adequate self-ability and mechanical properties for concretes produced with mixed use of recycled gravel and sand (CAA-1) and with total replacement of natural sand by recycled sand (CAA-3).

Keywords: self-compacting concrete; recycled concrete aggregates; particle packing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo global de materiais em construções residenciais e intensidade do consumo de cimento e aço	21
Figura 2 – Consumo global de materiais em construções não residenciais e intensidade de cimento e aço	22
Figura 3 – Demanda por agregados no Brasil (2000-2021) e projeção (2022).....	23
Figura 4 – Quantidade de RCD e RSU coletados no período de 2010 a 2020	24
Figura 5 – Comparação da proporção de dosagem de um CAA e de um CCV	31
Figura 6 – Partícula de agregado reciclado de concreto (ARC)	36
Figura 7 – Comparação de morfologia dos agregados naturais e reciclados.....	38
Figura 8 – Interfaces dos agregados reciclados de concreto (ARC).....	48
Figura 9 – Evolução da absorção de água de agregados em função do tempo	57
Figura 10 – Abordagem de mistura em dois estágios (<i>T SMA</i>).....	60
Figura 11 – Imagens de MEV de amostras de concreto com AGR.....	60
Figura 12 – Imagens de amostras de CAA com ARC.....	62
Figura 13 – Empacotamento de um conjunto granular.....	66
Figura 14 – Efeitos de interação entre as partículas	72
Figura 15 – Fluxograma ilustrativo das etapas e atividades do programa experimental.....	83
Figura 16 – Agregados naturais e agregados reciclados utilizados para a produção dos concretos	84
Figura 17 – Curvas granulométricas das britas naturais e britas recicladas utilizadas na pesquisa.....	87
Figura 18 – Curvas granulométricas da areia natural e da areia reciclada utilizadas na pesquisa	88
Figura 19 – Curvas granulométricas das frações de material pulverulento dos agregados reciclados	88
Figura 20 – Grupo de fragmentos do agregado de RCD após separação manual	89
Figura 21 – Curva granulométrica dos materiais finos.....	92
Figura 22 – Curva do ponto de saturação do aditivo SP	94
Figura 23 – Teste do aditivo SP na pasta de cinza volante.....	95
Figura 24 – Teste do aditivo SP na pasta de sílica ativa.....	95
Figura 25 – Sequência de mistura dos materiais para produção do CAA	101
Figura 26 – Amostras preparadas para o ensaio de MEV	107

Figura 27 – Curvas de dosagem resultantes do modelo de Alfred	109
Figura 28 – Classes do índice de estabilidade visual (IEV)	115
Figura 29 – Aspecto visual dos concretos após ensaio de <i>slump-flow</i>	115
Figura 30 – Resultados de <i>slump-flow</i> dos concretos em relação ao volume de pasta e ao consumo de finos	116
Figura 31 – Resultados de tempo de escoamento dos concretos em relação ao volume de pasta e ao consumo de aglomerantes	117
Figura 32 – Resultados dos concretos no ensaio de Anel J em relação ao consumo de agregados graúdos	119
Figura 33 – Comportamento dos concretos no ensaio de Anel J.....	120
Figura 34 – Resultados de massa específica do concreto	121
Figura 35 – Relação entre o índice de vazios e a relação <i>a/agl</i> dos concretos	122
Figura 36 – Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 28 e 90 dias	123
Figura 37 – Fator BI e consumo de aglomerantes dos concretos	124
Figura 38 – Resultados de resistência à tração dos concretos aos 90 dias	126
Figura 39 – Resultados de módulo de elasticidade estático dos concretos aos 28 dias.....	128
Figura 40 – Correlação dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade	129
Figura 41 – Resultados de absorção por imersão dos concretos	130
Figura 42 – Relação entre a absorção e o índice de vazios dos concretos no estado endurecido	131
Figura 43 – Evolução dos concretos no ensaio de absorção por capilaridade.....	132
Figura 44 – Ascensão de água nos corpos-de-prova após ensaio de absorção por capilaridade	133
Figura 45 – Imagens de MEV do CAA-1	134
Figura 46 – Análise de EDS do CAA-1 (Espectros 1, 2 e 3)	135
Figura 47 – Imagens de MEV do CAA-2.....	137
Figura 48 – Análise de EDS do CAA-2 (Espectros 4, 5 e 6)	138
Figura 49 – Análise de EDS do CAA-2 (Espectros 7, 8 e 9)	140
Figura 50 – Imagens de MEV do CAA-3.....	142
Figura 51 – Análise de EDS do CAA-3 (Espectros 10, 11 e 12)	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos e recomendações normativas para agregados reciclados usados em compósitos cimentícios.....	35
Tabela 2 – Dados de absorção e densidade de ARC encontrados em estudos da literatura.....	37
Tabela 3 – Dados encontrados na literatura de <i>slump-flow</i> e habilidade passante de CAA dosados com ARC (continua).....	39
Tabela 4 – Resumo de resultados de viscosidade e resistência à segregação de CAA dosados com ARC	44
Tabela 5 – Resumo de resultados de resistência mecânica de CAA dosados com ARC	50
Tabela 6 – Resumo de absorção de água de CAA dosados com ARC.....	55
Tabela 7 – Parâmetros de composições de CAA dosadas por empacotamento de partículas ..	76
Tabela 8 – Combinação de agregados usados nas dosagens de CAA	82
Tabela 9 – Ensaio realizados para caracterização dos agregados	85
Tabela 10 – Caracterização dos agregados naturais e dos agregados reciclados usados na pesquisa.....	86
Tabela 11 – Classificação do agregado de RCD quanto aos resíduos constituintes	89
Tabela 12 – Características químicas, físicas e mecânicas do CP V ARI.....	90
Tabela 13 – Massa específica dos materiais aglomerantes.....	93
Tabela 14 – Variáveis independentes adotadas na dosagem dos concretos	99
Tabela 15 – Número de corpos-de-prova do programa experimental	101
Tabela 16 – Ensaio de caracterização dos concretos no estado fresco	103
Tabela 17 – Ensaio de caracterização dos concretos no estado endurecido	104
Tabela 18 – Proporções dos materiais retornadas pelo código para cada composição de concreto.....	108
Tabela 19 – Proporções resultantes da aplicação do modelo de Alfred	110
Tabela 20 – Composições finais dos concretos	111
Tabela 21 – Parâmetros de dosagem analisados nas composições de concreto	112
Tabela 22 – Resultados de caracterização dos concretos quanto a auto adensabilidade.....	114
Tabela 23 – Resultados de massa específica de de índice de vazios dos concretos	121
Tabela 24 – Resultados de resistência mecânica e módulo de elasticidade dos concretos aos 28 e aos 90 dias.....	123
Tabela 25 – Resultados de absorção por capilaridade dos concretos	131

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON – Associação Brasileira de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACI – *American Concrete Institute*

AGR – Agregado Graúdo Reciclado

AMR – Agregado Miúdo Reciclado

AN – Agregado Natural

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ARCI – Agregado Reciclado Cimentício

ARM - Agregado Reciclado misto

BI – *Binder Index*

CAA – Concreto Autoadensável

CCV – Concreto Convencional Vibrado

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP V – Cimento Portland V

CV – Cinza Volante

EDS - Espectroscopia de raios X por Energia Dispersiva

EFNARC – *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

RC – Resistência do concreto à compressão

RT_C – Resistência do concreto à tração por compressão diametral

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA - *International Energy Agency*

IEV – Índice de Estabilidade Visual

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MMC – Método de Monte Carlo

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PPM - Particle Packing Model (Modelo de Empacotamento de Partículas)

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SA – Silica Ativa

SF – *Slump-Flow*

SP – Superplastificante

T SMA – Two Stage Mixing Approache (Abordagem de mistura em dois estágios)

VMA – Viscosity Modifying Admixture (Aditivo Modificador de Viscosidade)

ZT – Zona de Transição

LISTA DE SÍMBOLOS

cm – centímetros

cm³ – centímetros cúbicos

CO₂ – dióxido de carbono

GPa – Gigapascal

h – horas

kg – quilogramas

mm – milímetros

m³ – metros cúbicos

MPa – Megapascal

Σ – somatório de números

\bar{X} – Média aritmética amostral

σ – desvio padrão amostral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.3	OBJETIVOS.....	20
1.4	JUSTIFICATIVA	21
1.4.1	Justificativa Ambiental	21
1.4.2	Justificativa Técnica	26
1.4.3	Justificativa Econômica	28
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
2	REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1	CAA COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	31
2.1.1	Diretrizes de dosagem e composição de CAA	31
2.1.2	Os agregados reciclados de concreto	34
2.1.3	Efeitos dos agregados reciclados em composições de CAA	38
2.1.3.1	Propriedades do estado fresco	39
2.1.3.2	Microestrutura	47
2.1.3.3	Propriedades mecânicas.....	50
2.1.3.4	Absorção de água.....	54
2.1.4	Técnicas de produção de concretos com ARC	55
2.1.4.1	Ajuste do consumo de água	56
2.1.4.2	Pré-saturação do ARC e condição de SSS	58
2.1.4.3	Abordagem de mistura em dois estágios	59
2.1.4.4	Abordagem de mistura em dois estágios com adições minerais	61
2.1.4.5	Tratamento prévio dos ARC.....	63
2.1.5	Recomendações de uso dos agregados de RCD segundo a NBR 15116.....	64
2.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	66
2.2.1	Evolução dos modelos de empacotamento de partículas.....	67
2.2.1.1	Otimização da distribuição granulométrica.....	67
2.2.1.2	Modelos discretos de empacotamento de partículas	70
2.2.2	Otimização de misturas de CAA a partir de empacotamento de partículas	72
2.2.2.1	Ecoeficiência dos concretos.....	75

2.2.2.2	Parâmetros de dosagem de CAApor empacotamento de partículas	76
2.2.3	Métodos de dosagem de CAA baseado nos conceitos de empacotamento de partículas.....	78
2.2.4	Dosagem de CAA com ARC a partir de modelos de empacotamento de partículas.	78
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	82
3.1	MATERIAIS	84
3.1.1	Agregados.....	84
3.1.2	Materiais aglomerantes.....	90
3.1.3	Aditivo superplastificante.....	93
3.1.3.1	Teste do ponto de saturação.....	93
3.1.3.2	Efeito do aditivo frente ao uso de adições.....	94
3.2	DOSAGEM DOS CONCRETOS	96
3.2.1	Código de simulação de Monte Carlo	96
3.2.2	Dados de entrada adotados	98
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	100
3.3.1	Dosagem de água e de aditivo SP	100
3.3.2	Procedimento de mistura	101
3.3.3	Moldagem dos corpos-de-prova.....	101
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	103
3.4.1	Estado Fresco	103
3.4.2	Estado Endurecido.....	104
3.4.3	Tratamento estatístico dos resultados no estado endurecido.....	105
3.4.4	Ensaio de microscopia (MEV e EDS)	106
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	108
4.1	COMPOSIÇÃO DOS CONCRETOS	108
4.1.1	Proporcionamento resultante do modelo de Alfred.....	108
4.1.2	Consumos de materiais para a produção dos concretos	111
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO	114
4.2.1	Coesão pelo Índice de Estabilidade Visual	114
4.2.1	Fluidez (habilidade de preenchimento)	116
4.2.2	Viscosidade pelo tempo de escoamento	117
4.2.3	Habilidade passante pelo ensaio de Anel J.....	118
4.3	MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS	121

4.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS.....	123
4.4.1	Resistência à compressão	123
4.4.2	Resistência à tração por compressão diametral	126
4.4.3	Módulo de elasticidade estático	128
4.5	ABSORÇÃO POR IMERSÃO	129
4.6	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	131
4.7	IMAGENS DE MICROSCOPIA (MEV) E ANÁLISE ELEMENTAR (EDS).....	134
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
	REFERÊNCIAS	149
	APÊNDICE A – METODOLOGIA DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	168
	APÊNDICE B – PORTFÓLIO DE ARTIGOS	176
	APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	187

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A velocidade do processo de urbanização nas últimas décadas potencializou as atividades de construção civil, o que tem resultado em uma nova tendência: construção de edifícios altos, estruturas esbeltas e modernas, com formato complexo, e elevada taxa de armadura. Isso leva à demanda constante de novas tecnologias e avanço dos processos construtivos.

Como exemplo, pode-se citar o concreto autoadensável (CAA), que foi desenvolvido exatamente para suprir uma nova demanda que surgiu no mercado. Na década de 1980 a indústria da construção no Japão enfrentava problemas de redução da mão-de-obra qualificada, o que, conseqüentemente, levou à redução da qualidade e durabilidade das estruturas de concreto. Inserido nesse contexto, o CAA foi proposto como uma solução para obtenção de estruturas de concreto mais duráveis por dispesar a operação de vibração durante a concretagem (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

Segundo a definição do EFNARC¹ (2005), o CAA é um concreto que não requer vibração para lançamento e compactação, é capaz de fluir sob ação de seu próprio peso, preenchendo completamente a fôrma e alcançando compactação total, mesmo na presença de alta densidade de armadura. No estado endurecido, o CAA é denso, homogêneo e possui as mesmas propriedades técnicas do concreto convencional vibrado (CCV).

Três propriedades devem ser satisfeitas para que um concreto seja caracterizado como autoadensável: fluidez, que determina a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços; habilidade passante, que define a capacidade do CAA de passar através dos obstáculos como armaduras, reduções de seção e aberturas e seções estreitas, sem que haja obstrução do fluxo; e resistência à segregação, que caracteriza a capacidade do concreto de se manter coeso, ou seja, reter os componentes graúdos em suspensão na mistura e permanecer homogêneo (GOODIER, 2003; GOMES; BARROS, 2009).

Para vários pesquisadores, dentre as inovações tecnológicas do concreto, o CAA é reconhecido como uma das mais importantes das últimas décadas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; CORINALDESI; MORICONI, 2011). De acordo com Gomes e Barros

¹ EFNARC: European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems

(2009), essa evolução está associada a vantagens importantes para a indústria da construção civil por demandar menor tempo de concretagem.

É certo que a indústria da construção civil incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias, além de desempenhar um papel importante no desenvolvimento econômico e social do país, pois impulsiona a geração de empregos e proporciona infraestrutura necessária à sociedade, por meio de moradias, estradas, fornecimento de água e saneamento básico, por exemplo. Porém, ao mesmo passo, o setor é reconhecido como um dos que mais causam danos ambientais uma vez que a cadeia de produção envolve diversas atividades degradantes. Dentre elas, o consumo de recursos naturais não renováveis, como minerais, água e energia, ocorre em larga escala, além da geração de resíduos sólidos e da contaminação de solos e águas em algumas situações (THOMAS; COSTA, 2017). Há também preocupação crescente em relação aos efeitos do desmatamento e da emissão de gases de efeito estufa: mudanças climáticas severas, aquecimento global, perda de biodiversidade dos ecossistemas e erosão dos solos (KILBERT, 2016).

O cenário de crescimento populacional e processo acelerado de urbanização tem agravado essa situação, pois conduz à construção de novos edifícios e à demolição de edifícios antigos em larga escala (RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018). Como resultado, a extração de recursos naturais para obtenção de matéria-prima tem se tornado insustentável, levando ao esgotamento gradativo das reservas (GESOGLU *et. al.*, 2015) e o volume de resíduos de obra gerado anualmente é cada vez maior.

Na tentativa de minimizar esses danos ambientais, nos últimos anos alguns instrumentos legais foram instaurados. No Brasil, a resolução nº 307 do CONAMA² (Brasil, Ministério do Meio Ambiente, 2002), em vigor desde 2003 foi um marco e estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos gerados pela construção civil, com o objetivo de disciplinar as ações necessárias e minimizar os impactos ambientais. Uma das principais ações que vêm sendo exploradas nesse sentido é a reutilização e reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), classificados pela resolução nº 307 (CONAMA, 2022) como resíduos de Classe A. Os materiais granulares provenientes do beneficiamento desses resíduos são conhecidos como agregados reciclados e podem ser utilizados na produção de concretos e argamassas em substituição aos agregados naturais (AN). Recentemente uma nova versão da NBR 15116 entrou em vigência (ABNT, 2021a) trazendo atualizações em relação aos requisitos e métodos de ensaios para aceitação desses agregados reciclados (miúdos e

² CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

gráudos). Essa regulamentação também contribui no sentido de incentivar o uso desses materiais na indústria da construção civil.

Dentre os diversos tipos de agregados reciclados, os materiais granulares oriundos de RCD de concreto, conhecidos como agregados reciclados de concreto (ARC), têm sido os de maior interesse. Isso porque o uso de ARC é uma alternativa que traz um benefício ambiental duplo, pois ao mesmo passo que pode mitigar o consumo de recursos naturais limitados, também evita o acúmulo de resíduos de obra no meio ambiente (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Com o emprego de agregados reciclados a vida útil dos recursos extraídos da natureza é renovada em novas cadeias de produção, gerando um ciclo produtivo mais sustentável. Em adição aos benefícios ambientais, o uso do ARC também pode ser econômico, dependendo da situação e das condições locais. O custo de envio de resíduos para aterros sanitários pode ser maior que o custo de triagem e venda de resíduos de concreto de um canteiro de obras a um reciclador (ou mesmo pagando uma taxa pela coleta), principalmente quando existem taxas de aterro. Resumindo, o custo do uso de materiais de demolição em uma nova construção, no mesmo local, também pode ser menor do que a aquisição de novos materiais naturais (ASLANI *et. al.*, 2018).

Diante dos motivos expostos acima, tecnologistas do concreto e pesquisadores da área têm se dedicado cada vez mais no sentido de viabilizar o uso de agregados reciclados na produção de concretos. Especialmente, nas duas últimas décadas, um novo desafio tem despertado o interesse dos pesquisadores: empregar ARC em substituição ao AN em dosagens de CAA. Estudos envolvendo esse tema têm se mostrado bastante presentes na literatura nos últimos anos (KOU; POON, 2009; GRDIC *et. al.*, 2010; CORINALDESI; MORICONI, 2011; MOREIRA, 2012; CARRO-LÓPEZ *et. al.* 2015; GESOGLU *et. al.*, 2015; GONZÁLEZ-TABOADA *et. al.*, 2017a).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Embora a incorporação de agregados reciclados seja uma solução com elevado potencial de contribuir para o desenvolvimento de concretos ecológicos e construções mais sustentáveis, os agregados reciclados de concreto possuem certas características que implicam em limitações sobre seu uso em concretos estruturais, especialmente na produção de misturas de CAA (GÜNEYISI *et. al.*, 2014; LI *et.al.*, 2017).

É consenso na literatura que os ARC têm menor densidade, menor resistência mecânica e maior capacidade de absorção de água do que os agregados naturais, o que se deve

à camada de argamassa residual que fica aderida à sua superfície (TAM; GAO; TAM, 2005; UYGUNOĞLU; TOPÇU; ÇELİK, 2014; GESOGLU *et. al.*, 2015; KEBAİLİ *et. al.*, 2015; BAHRAMI *et. al.*, 2020). Vários estudos apontam que, para taxas altas de incorporação de ARC, essas características de composição, forma e textura dos ARC podem resultar em prejuízos às propriedades do concreto, como perda de trabalhabilidade (GRDIC *et. al.*, 2010; CARRO-LOPEZ *et al.*, 2015; RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018; ASLANI *et. al.*, 2018), formação de uma microestrutura mais porosa (POON; SHUI, LAM, 2004a; LEITE; MONTEIRO, 2016) e consequente redução da resistência mecânica (KOU; POON, 2009; CORINALDESI; MORICONI, 2011; CARRO-LOPEZ *et al.*, 2015; GESOGLU *et al.*, 2015) e da durabilidade (TUYAN, MARDANI-AGHABAGLOU; RAMYAR, 2014).

A elevada absorção de água e a baixa resistência são os principais desafios para a utilização dos ARC em misturas de CAA, pois são misturas que requerem alta fluidez e resistência mecânica estrutural (TANG *et. al.*, 2020). Sobretudo, as misturas de CAA são bastante sensíveis às variações dos materiais (COUTINHO, 2011) e mais vulneráveis enquanto plásticas, o que gera grande preocupação em relação aos efeitos negativos dos ARC no estado fresco.

De maneira lógica, admitindo que o concreto com ARC tenha alcançado maior estado de fluidez, provavelmente a mistura terá consumido mais água do que o convencional, logo, a densidade, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade serão inferiores aos de um concreto convencional (FIOL *et. al.*, 2018). Daí tem-se que uma dosagem apropriada é essencial para obter as características requeridas de um CAA produzido com ARC (LIN *et. al.*, 2004; KOU; POON, 2009; GESOGLU *et. al.*, 2015).

Dentro desse contexto, reside o seguinte problema: como produzir misturas de CAA incorporando ARC sem, contudo, comprometer a trabalhabilidade e as propriedades do concreto no estado endurecido?

1.3 OBJETIVOS

O objetivo da presente pesquisa é dosar CAAs com a incorporação de ARC a partir de técnicas de empacotamento de partículas de modo que o desempenho do concreto nos estados fresco e endurecido seja adequado à aplicação em estruturas.

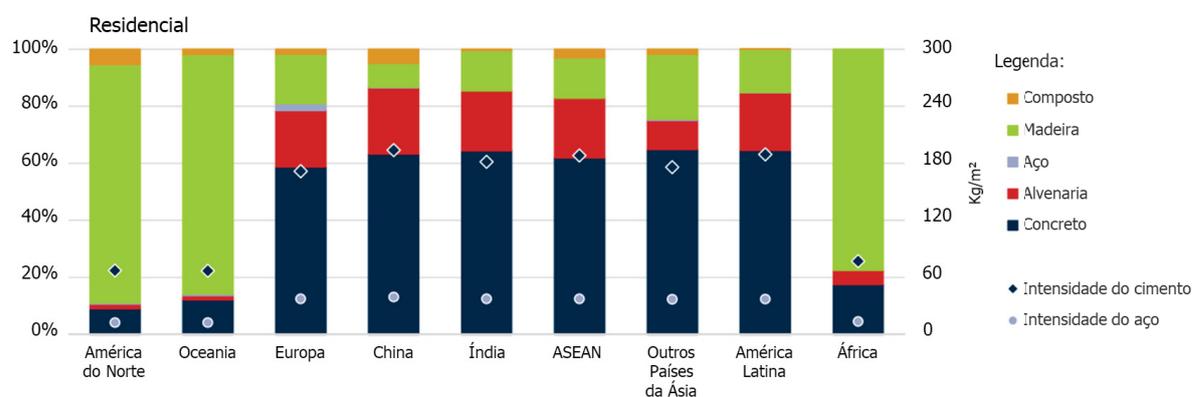
1.4 JUSTIFICATIVA

1.4.1 Justificativa Ambiental

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo. Com uma estimativa de consumo anual de 30 bilhões de toneladas, o concreto supera a produção per capita de qualquer outro material e a demanda mundial continua crescendo (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017).

Dados da IEA³ apontados no Relatório de Status Global (IEA, 2018) demonstram que em países da Europa, da América Latina, na China, na Índia e em outros países da Ásia, o concreto representa mais de 60% dos materiais usados em construções residenciais (Figura 1). Em construções não residenciais esse número chega a ser maior que 80% na China, na África e na América Latina (Figura 2).

Figura 1 – Consumo global de materiais em construções residenciais e intensidade do consumo de cimento e aço

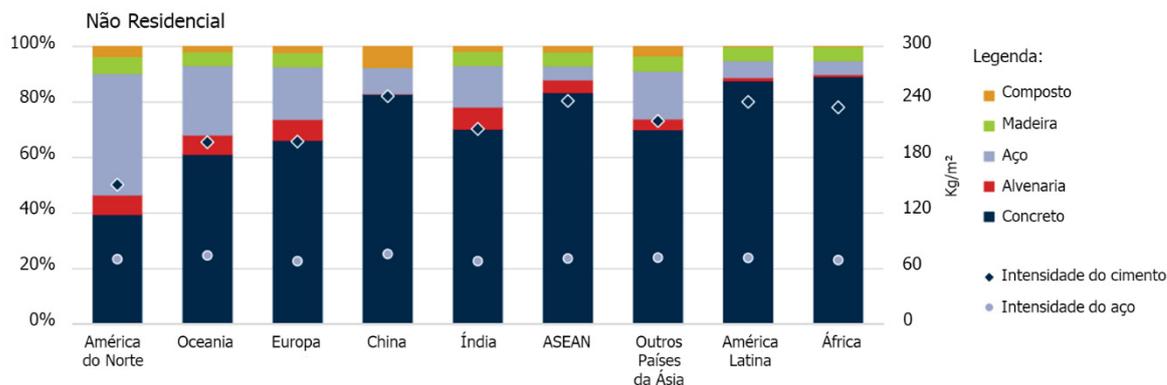


Notas: *ASEAN* é a sigla para a Associação das Nações do Sudeste Asiático (Association of Southeast Asian Nation); A *América do Norte* compreende o Canadá, os Estados Unidos e o México; *Intensidade do cimento* e *Intensidade do aço* se referem ao consumo médio para construir 1m² de área residencial ou não residencial (em kg/m²).

Fonte: Adaptado de Agência Internacional de Energia (2017)

³ IEA: Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

Figura 2 – Consumo global de materiais em construções não residenciais e intensidade de cimento e aço



Notas: *ASEAN* é a sigla para a Associação das Nações do Sudeste Asiático (Association of Southeast Asian Nation); A *América do Norte* compreende o Canadá, os Estados Unidos e o México; *Intensidade do cimento* e *Intensidade do aço* se referem ao consumo médio para construir 1m² de área residencial ou não residencial (em kg/m²).

Fonte: Adaptado de Agência Internacional de Energia (2017)

Proporcionalmente, a demanda por matéria-prima destinada à indústria do concreto tem resultado na extração de grandes volumes de recursos naturais, uma vez que 60%-80% do seu volume é composto por agregados (CARRO-LÓPEZ *et. al.*, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014; TANG *et. al.*, 2020).

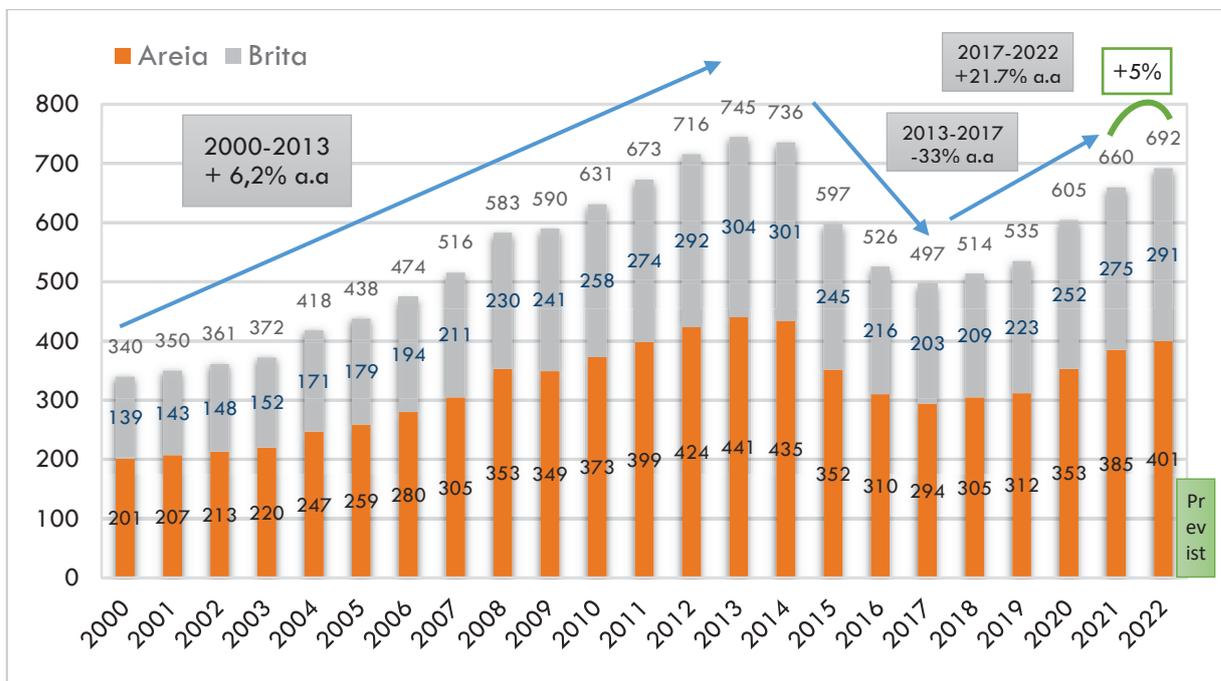
Segundo informações do PNUMA⁴ (2019), os agregados, que incluem areia, cascalho e brita, são o material sólido com maior volume extraído globalmente e o segundo recurso natural mais explorado no planeta, atrás apenas da água. Impulsionado por fatores como urbanização, crescimento populacional, crescimento econômico e mudanças climáticas, o uso de agregados triplicou nas últimas duas décadas, atingindo uma estimativa de 40-50 bilhões de toneladas por ano. Esse volume é suficiente para construir uma parede de 27 metros de largura e 27 de altura em volta de todo o planeta Terra.

Diante desse cenário preocupante, o novo relatório do PNUMA publicado recentemente – “Areia e Sustentabilidade: 10 Recomendações Estratégicas para Evitar uma Crise” – chama a atenção para os impactos do estado atual de extração, uso e gestão da areia e apresenta recomendações de ações para definir a agenda global e atender às necessidades de sustentabilidade ambiental. O relatório é enfático ao destacar que a areia deve ser reconhecida como um recurso estratégico e que sua extração e uso devem ser repensados a fim de evitar uma crise (PNUMA, 2022).

⁴ PNUMA: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

No cenário nacional, um relatório publicado pela ANEPAC⁵ (2015) apontou que em 2014 o consumo de agregados no Brasil atingiu a marca de 741 milhões de toneladas, correspondente a 3,7 toneladas per capita. O gráfico apresentado na Figura 3 mostra a demanda por agregados no Brasil no período de 2000 até 2021. Observa-se que no período entre 2013 e 2017 houve um decréscimo de 33% no mercado em razão da crise econômica, porém, já em 2021 o setor registrou um aumento de 9% em relação ao ano anterior, atingindo a marca de 660 milhões de toneladas de agregados consumidos (ANEPAC, 2022).

Figura 3 – Demanda por agregados no Brasil (2000-2021) e projeção (2022)



Fonte: Adaptado de ANEPAC (2022)

É importante destacar que a extração de materiais em reservas naturais gera diversos prejuízos ambientais; vários deles irreversíveis. Por exemplo, a extração de sedimentos aluviais para obtenção de areia natural em leitos de rios é responsável pela remoção da cobertura vegetal dos solos, causa alterações do perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais uma vez que modifica a estrutura hidrológica e hidrogeológica dos cursos d'água (BIANCHINI *et. al.*, 2005; BARBOSA; COURA; MENDES, 2008). Quando a extração ocorre em formações rochosas de áreas acidentadas e montanhosas, no caso da obtenção de agregados artificiais, há alteração da paisagem e potencialmente desencadeia problemas de estabilidade (BIANCHINI *et. al.*, 2005). O impacto

⁵ Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

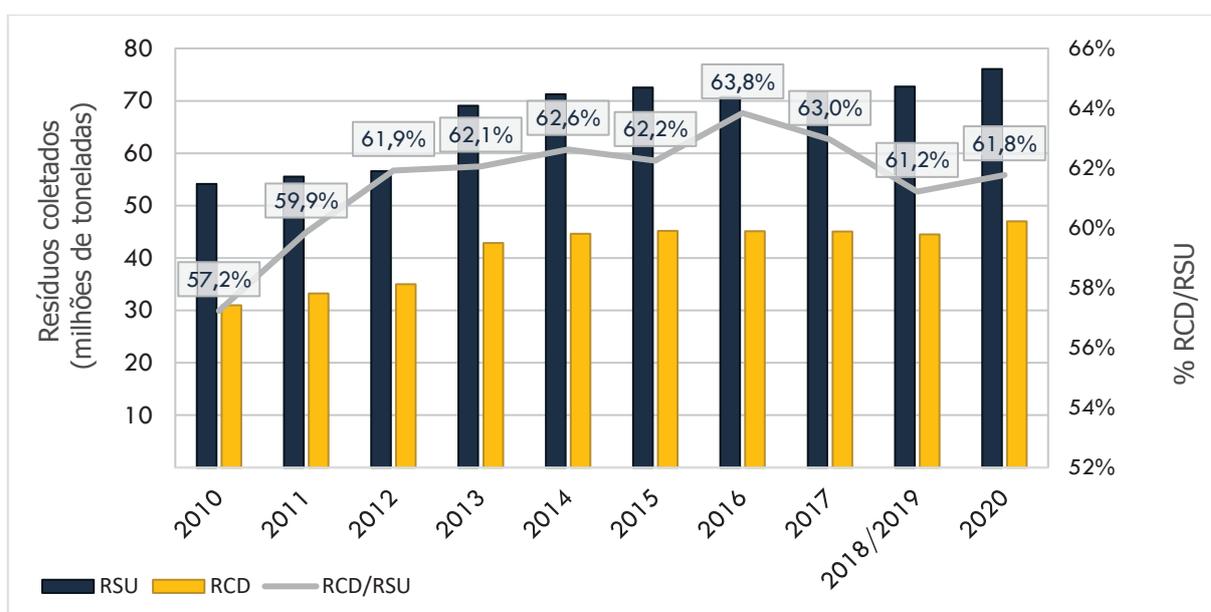
ambiental advindo do uso deste material é ainda agravado pela informalidade nos processos de extração (JOHN, 2011).

Outro efeito negativo do incremento das atividades do setor da construção civil é a geração de grandes quantidades de resíduos de obra que, na falta de um plano de gerenciamento, muitas vezes não recebem uma destinação adequada e acabam sendo descartados em locais irregulares (JOHN, 2011; MIRANDA *et. al.*, 2014).

Segundo a ABRECON⁶ (2015), no Brasil, o descarte de RCD realizado de modo irregular tem acarretado uma série de impactos negativos à economia local dentro da malha urbana das cidades e danos ambientais. Isso porque esses resíduos têm causado ou facilitado enchentes, perda de infraestrutura de drenagem por obstrução das galerias pluviais e assoreamento de canais, proliferação de vetores transmissores de doenças graves, poluição e aumento dos custos da administração pública.

A ABRELPE⁷ publica anualmente um panorama apresentando dados levantados pelo IBGE⁸ acerca da geração e da coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. O gráfico apresentado na Figura 4 demonstra os dados de coleta de RSU e RCD de 2010 a 2020. Observa-se que desde 2012 a taxa de RCD em relação ao volume total de RSU coletado no Brasil vem se mantendo em torno de 60% todos os anos.

Figura 4 – Quantidade de RCD e RSU coletados no período de 2010 a 2020



Fonte: Dados da ABRELPE e do IBGE (2011- 2021)

⁶ ABRECON: Associação Brasileira para reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

⁷ ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

⁸ IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Segundo o último panorama publicado, no ano de 2020 foram coletadas quase 47 milhões de toneladas de RCD em território nacional, o que representa quase 62% do volume total de RSU coletado e um crescimento de 5,5% em relação ao ano anterior (ABRELPE, 2021). Diante desse cenário se justifica a importância do uso de agregados reciclados como alternativa para reutilização e reciclagem dos RCD.

A indústria da construção civil é também responsável pela emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂), e consumo de energia em larga escala. Em particular, a indústria global de cimento Portland é o terceiro setor que mais consome energia industrial no mundo, com uma taxa de 7%, e é também o segundo setor com maior parcela de emissão de CO₂, responsável por cerca de 7% do total das emissões globais (CSI, 2018; IEA, 2020).

A exemplo, o relatório de Iniciativa Sustentável do Cimento (CSI⁹), publicado pela WBCSD¹⁰ em 2016, aponta que, somente no ano de 2014, mais de 600 kg de CO₂ foram emitidos por tonelada de cimento produzido globalmente. Nesse ano, somente no Brasil foram produzidos mais de 71 milhões de toneladas de cimento (SNIC¹¹, 2020). Isso resultou em mais de 42 bilhões de toneladas de CO₂ emitidos somente no ano de 2014.

Segundo outro relatório mais recente da IEA (2021), a intensidade direta de CO₂ da produção de cimento aumentou 1,8% ao ano no período de 2015 a 2020. Além disso, de 2015 a 2020, estima-se que o fator clínquer (quantidade de clínquer em relação a quantidade de cimento fabricado) tenha aumentado em média 1,6% ao ano, atingindo uma estimativa de 0,72 em 2020. Em função disso, são necessárias quedas anuais de 3% na intensidade direta de CO₂ emitido para acompanhar a meta de Emissões Neutras até 2050.

Dados do SNIC (2020) mostram que, entre os anos de 1990 a 2019, o Brasil seguiu um cenário inverso. Houve uma redução de 80% para 67% do fator clínquer, o que foi impulsionado pelo aumento do percentual de adições de 20% para 33% na produção do cimento e resultou na redução das emissões de carbono em 19%. Historicamente, o Brasil é o país que mais utiliza adições no mundo, tendo sido ultrapassado pela Índia em 2019. Entretanto, esse é um cenário excepcional em comparação a outros países, não minimizando os danos ambientais existentes.

⁹ Cement Sustainability Initiative (CSI)

¹⁰ World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

¹¹ Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC)

Esses dados evidenciam que deve haver esforços globais no sentido de reduzir as emissões de CO₂ no setor da construção civil. Para alcançar essa meta diversas medidas devem ser adotadas. Dentre elas, a redução do fator clínquer, a redução do consumo de cimento Portland e o uso de materiais alternativos na produção de concretos.

1.4.2 Justificativa Técnica

Sob aspectos ambientais, o uso de ARC para produção de concreto é nitidamente vantajoso. Remanesce, então, o desafio técnico de desenvolver concretos que satisfaçam as características desejadas de aplicabilidade, resistência mecânica e durabilidade. Buscando solucionar essa questão, as técnicas de empacotamento de partículas têm sido abordadas como um método de dosagem promissor para produção de concretos com agregados reciclados, pois conduz a um proporcionamento otimizado. Frente às inovações tecnológicas da indústria do concreto novos desafios têm surgido no sentido de viabilizar o uso de ARC. Dentre esses desafios, um dos que tem ganhado mais ênfase atualmente é o emprego desses materiais em misturas auto adensáveis.

O CAA é uma tecnologia de concreto que vem conquistando cada vez mais espaço dentro do mercado, principalmente em países desenvolvidos da Europa e da Ásia e nos Estados Unidos. O que justifica o CAA ser um material tão atrativo são as inúmeras vantagens conferidas, dentre as quais se destacam (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008):

- Construção mais acelerada, pois o lançamento é mais rápido e dispensa adensamento;
- Redução da mão-de-obra no canteiro porque elimina a vibração e facilita o espalhamento e o nivelamento do concreto,
- Melhoria do acabamento final da superfície;
- Maior liberdade arquitetônica em estruturas, pois pode ser facilmente moldado em fôrmas esbeltas, ou de formato e dimensões complexas e com alta taxa de armadura;
- Aumento da durabilidade, pois evita falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- Permite obter um ganho ecológico, pois sua composição inclui consumos elevados de adições que são oriundas de resíduos e subprodutos de outras indústrias;
- Promove um ambiente de trabalho mais seguro em função da diminuição do número de operários;

- Preserva a saúde dos funcionários porque reduz o barulho de concretagem em virtude da ausência de vibração;
- Possibilita a redução do custo final do concreto e/ou da estrutura caso sejam computados economicamente todos os ganhos citados acima.

Recentemente, Costa e Cabral (2019) realizaram um estudo de caso comparando o uso de CAA e o uso de CCV em uma mesma obra vertical. Os resultados desse estudo apontaram que o uso de CAA propiciou uma redução de 84,5% no tempo bruto de concretagem (considerando eventuais paradas) e de 60,7% na produtividade da mão de obra, medida em tempo de trabalho (homens-hora) para uma unidade de serviço (metro cúbico de concretagem). Outro estudo desenvolvido na Suécia demonstrou que o CAA proporciona melhorias significativas à saúde dos funcionários envolvidos na concretagem, pois reduz o risco de acidentes e lesões em até 70% (RWAMAMARA; SIMONSSON, 2012).

Vale acrescentar que as técnicas de empacotamento de partículas também têm sido bastante adotadas em pesquisas que envolvem dosagem de CAA, sobretudo com o intuito de reduzir o consumo de cimento e mitigar a emissão de CO₂ por parte da indústria do concreto (WANG *et. al.*, 2014; MUELLER; WALLEVIK; KHAYAT, 2014; LONG *et. al.*, 2017; PELISSER, VIEIRA; BERNARDIN, 2018; YOUSUF; SANCHEZ; SHAMMEH, 2019).

Apesar das vantagens consagradas do CAA, no Brasil essa tecnologia ainda não alcançou tanta popularidade (HELENE, TUTIKIAN, 2015). Segundo Santos (2016), a aplicação do CAA no Brasil ainda é mais restrita em obras de arte especiais, obras com elevada taxa de armadura ou formas complexas e em fábricas de pré-moldados. Para Helene e Tutikian (2015), duas das principais limitações do uso do CAA é o custo mais elevado, comparado ao CCV, e o conservadorismo dos profissionais envolvidos nas decisões do processo construtivo devido à falta de conhecimento e prática a respeito da tecnologia.

1.4.3 Justificativa Econômica

Mesmo com a redução de mão-de-obra em campo, o custo dos insumos requeridos para a produção do CAA, sobretudo o elevado consumo de finos, acaba aumentando o preço final do produto. O estudo de Costa e Cabral (2019) demonstra exatamente esse cenário. Comparado ao uso de CCV, os resultados apontaram que o uso de CAA propiciou redução de 60,9% no custo da mão-de-obra de em comparação com CCV. Contudo, o preço de venda do CAA pela central de concreto era 10,7% mais caro que o CCV, o que elevou o preço final da concretagem, pois o custo do material tem maior peso. Costa e Cabral (2019 defendem que o caminho para viabilizar e ampliar o uso do CAA em obras verticais é fazer com que o preço cobrado por metro cúbico de CAA seja próximo do preço cobrado para o CCV.

Do ponto de vista econômico, os agregados reciclados são um material bastante atrativo, pois podem ser mais baratos do que os agregados naturais a depender das condições operacionais e de transporte, como a distância de deslocamento, das regulamentações de ambientais vigentes e outros fatores envolvidos no processo de beneficiamento.

De acordo com Whitaker (2005), a grande vantagem competitiva dos agregados de RCD é a capacidade de minimizar as distâncias de transporte entre produção e consumidor final, que é responsável por 2/3 dos custos do produto (ANGULO, 2005). Além disso, o processo de beneficiamento pode ser mais barato uma vez que as operações industriais de triagem e britagem dos resíduos requer menor quantidade de energia do que as operações de extração de agregados em reservas naturais (SILVA *et. al.*, 2016). E, as despesas com limpeza urbana e os custos de transporte e disposição dos resíduos em aterros licenciados podem ser reduzidos, especialmente dentro de grandes centros urbanos, além de diminuir o risco de taxaço por multas regulatórias. Cabe ressaltar que essas circunstâncias são mais aplicáveis em outros países do que no Brasil uma vez que, internacionalmente, há legislaçoes mais rigorosas e taxas mais elevadas (ANGULO, 2005).

Para Melo (2011) existem vários fatores que desfavorecem o incentivo para a prática da reciclagem de RCD no Brasil, entre eles: dificuldades técnicas, financeiras e sociais de implantação e manutenção de usinas de reciclagem e, principalmente, a ausência de políticas públicas de fiscalizaço e sançoes econômicas rigorosas para regulamentar a destinaço irregular de resíduos.

Apesar desses obstáculos, Miranda, Angulo e Carelli (2009) apontaram que os agregados reciclados podem ser, em média, 40% mais baratos do que os agregados naturais. Paschoalin Filho, Faria, Pires e Duarte (2016) verificaram uma diferença de aproximadamente 62% entre os preços de comercialização dos agregados reciclados e naturais na região de São Paulo.

Nesse sentido, a substituição de AN por ARC nas dosagens de CAA é apontada por vários pesquisadores da área como uma alternativa potencial para tornar o CAA mais econômico (CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA, 2008; KEBÄILI *et.al.*,2015; SALESA *et. al.*, 2017; ASLANI *et. al.*, 2018; RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018).

Como discorrido acima, a redução do consumo de cimento também é um avanço importante para a tecnologia do CAA, pois a composição se torna mais barata e mais ecológica. Diante disso, justifica-se que a aplicação das técnicas de empacotamento de partículas na dosagem pode contribuir para a solução de adversidades ambientais, técnicas e econômicas que ainda limitam o uso de CAA e o uso de ARC na indústria de concreto, além de favorecer uma cadeia de produção mais sustentável ambientalmente.

1.5 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, que compreendem os conteúdos abaixo descritos.

O **Capítulo 1** traz uma introdução ao tema de estudo, contextualizando os assuntos pertinentes dentro do meio técnico-científico. A partir disso, são apresentados o problema de pesquisa e as justificativas que demonstram a relevância do tema escolhido, além de descrever o objetivo proposto para o trabalho.

O **Capítulo 2** contém uma revisão sistemática da literatura em relação a produção de concretos auto adensáveis com agregados reciclados de concreto e a evolução dos modelos e técnicas de empacotamento de partículas para dosagem de concretos. Para isso, são apresentados resultados de estudos publicados nacionalmente e internacionalmente discorrendo sobre os assuntos mencionados.

O **Capítulo 3** apresenta a metodologia adotada no programa experimental da pesquisa. Primeiramente são descritos os materiais usados na pesquisa (agregados e aglomerantes) e suas principais características físicas e químicas. Na sequência é descrito o processo de dosagem dos concretos a partir do modelo de empacotamento de partículas, os procedimentos seguidos na produção das misturas em laboratório e os métodos de ensaio adotados para caracterizar os concretos no estado fresco e no estado endurecido.

Os resultados obtidos no programa experimental da pesquisa são apresentados no **Capítulo 4** e paralelamente são analisados e discutidos com base nas variáveis de estudo contempladas no programa experimental.

Por fim, no **Capítulo 5** são apresentadas conclusões gerais obtidas a partir do programa experimental conduzido no trabalho e são também propostas sugestões para realização de trabalhos futuros visando o avanço científico do tema estudado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

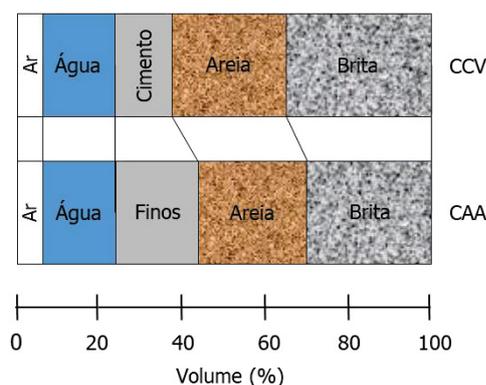
O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura abordando os assuntos que fundamentam a pesquisa. Para o desenvolvimento do capítulo foi realizada uma revisão sistemática seguindo o método *Methodi Ordinatio*, proposto por Pagani, Kovaleski e Resende (2015). O processo de aplicação do método é apresentado no Apêndice A e o portfólio bibliográfico criado é apresentado no Apêndice B.

2.1 CAA COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

2.1.1 Diretrizes de dosagem e composição de CAA

Segundo Okamura e Ouchi (2003), o primeiro protótipo de CAA foi desenvolvido em 1988 usando materiais já empregados no mercado. Para alcançar auto adensabilidade, Okamura e Ozawa formularam uma dosagem com quantidade de agregado graúdo limitada, baixa relação água/finos e uso de aditivo superplastificante. A Figura 5 ilustra uma comparação da proporção de materiais na dosagem de um CAA e um CCV.

Figura 5 – Comparação da proporção de dosagem de um CAA e de um CCV



Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

Os materiais selecionados para a composição de um CAA e a proporção entre eles devem satisfazer, sobretudo, o comportamento da mistura requerido no estado fresco. Conforme descrito por Gomes e Barros (2009), deve ser uma mistura com alta fluidez e suficiente viscosidade e coesão entre os componentes, a fim de garantir um fluxo contínuo e

uniforme de toda a mistura, preenchendo toda a fôrma sem exibir segregação e sem causar bloqueio entre as armaduras ou outros obstáculos.

Para tanto, os materiais empregados na dosagem de um CAA, na prática, são os mesmos usados para o CCV, porém com maior quantidade de finos (cimento, adições minerais quimicamente ativas ou fileres) e acrescido de aditivos plastificantes, superplastificantes e modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A fração de finos de uma composição de CAA é predominantemente constituída por Cimento Portland, que é requerido em grande quantidade, e materiais cimentícios suplementares como cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto forno, metacaulim e fileres não reativos. Essas adições inertes e reativas são usadas para aumentar e manter a viscosidade e a coesão da mistura, proporcionando resistência à segregação, e têm também a função de regular a quantidade de cimento a fim de reduzir o calor de hidratação e a retração térmica (EFNARC, 2005), motivo pelo qual são adicionadas em substituição ao cimento como uma parcela do volume total de finos.

O que justifica as composições de CAA serem formuladas com elevado teor de finos é o risco de segregação. Misturas de CAA são caracterizadas por apresentarem alta fluidez, então, caso sejam mal dosadas, irão exibir tendência à segregação. Como a resistência à segregação de uma mistura de CAA normalmente é controlada pela viscosidade plástica da pasta ou da fase de argamassa, o elevado teor de finos tem o propósito de regular a viscosidade plástica, pois a concentração sólida desses materiais exerce grande influência na reologia da mistura. Outra característica das dosagens de CAA é a relação água/aglomerante (a/agl) relativamente baixa, que também tem a função de melhorar a estabilidade da mistura (MUELLER; WALLEVIK; KHAYAT, 2014).

Em relação aos agregados, segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a seleção do agregado miúdo está condicionada à demanda de água, pois é fator essencial sobre a coesão e fluidez do concreto. Deve-se priorizar o emprego de agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas para produção de CAA, pois aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água. Okamura e Ouchi (2003) complementam que, quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, maior será a resistência ao cisalhamento das argamassas, dificultando a deformabilidade do concreto.

Como a adição de finos desempenha um papel importante no CAA, agregados miúdos com menor módulo de finura são preferíveis para a produção de CAA, pois contribuem para aumentar a coesão da mistura. Quanto aos agregados graúdos, as exigências são mais restritivas quanto à dimensão máxima característica ($D_{máx}$) para garantir a

passagem do concreto por todos os obstáculos durante o lançamento e reduzir a tendência à segregação. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os aditivos superplastificantes são ingredientes indispensáveis na dosagem de misturas de CAA, pois são o meio de obter uma mistura de alta fluidez e baixa relação a/agl. De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), os aditivos superplastificantes (SP) à base de policarboxilatos são os mais aconselhados e os mais utilizados no CAA. Por serem aditivos poliméricos de alta eficiência, têm maior poder de dispersar e desflocular as partículas de cimento. Assim, permitem a redução da água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade.

Em alguns casos, o CAA é dosado com aditivos modificadores de viscosidade (no inglês *Viscosity Modifying Admixture - VMA*) a fim de ajustar a viscosidade da mistura e promover maior estabilidade para fins de reduzir o risco de segregação e exsudação. O uso de *VMA* não é sempre necessário, mas pode ser vantajoso em composições com baixo teor de finos, como os casos em que se deseja reduzir o consumo de cimento, ou agregados com graduação descontínua (ACI¹, 2007).

Gomes e Barros (2009) explicam que a adição do agente modificador de viscosidade afeta a fase aquosa da pasta de cimento, na qual cadeias de polímeros solúveis em água podem absorver alguma água livre no sistema, reforçando, assim, a viscosidade da pasta de cimento. Como resultado, menos água livre estará sujeita à exsudação. O emprego de *VMA* requer uma dosagem rigorosa para evitar efeitos adversos na viscosidade. Nanthagopalan e Santhanam (2011) formularam composições de CAA usando um teor ótimo de *VMA* e concluíram que, dosagens inferiores ao teor ótimo não foram suficientes para controlar a segregação e dosagens superiores ao teor ótimo resultaram em redução do *slump flow*.

Tanto para composições com agregados naturais quanto para as composições com ARC, atualmente, não há procedimentos normatizados para formular dosagens de CAA, ainda que existam diversos métodos propostos na literatura (OKAMURA; OZAWA, 1995; KHAYAT; GHEZAL; HADRICHE, 1999; SU; HSU; CHAI, 2001; TUTIKIAN, 2004; KHEDER; JADIRI, 2010; NEPOMUCENO; OLIVEIRA; LOPES, 2012). Uma prática comumente adotada por pesquisadores no Brasil é proporcionar as misturas de modo que o desempenho do CAA satisfaça os requisitos da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). O Guia Europeu de Especificação, Produção e Uso do Concreto Autoadensável (EFNARC², 2005) e o

¹ ACI: American Concrete Institute

² EFNARC = European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems

relatório de Concreto Autoadensável (ACI¹, 2007) também são documentos normativos usados como referência para caracterizar o desempenho do CAA no Brasil e em outros países.

2.1.2 Os agregados reciclados de concreto

Dentre os diversos tipos de agregados reciclados, os agregados reciclados de concreto são aqueles obtidos a partir do beneficiamento e processamento de resíduos de demolição de concreto. De acordo com Poon, Shui e Lam (2004), tipicamente, os ARC são compostos por 65-70% de agregados graúdos e miúdos naturais, em volume, e 30-35% de pasta de cimento.

Organizações em vários países desenvolveram especificações para caracterizar esses materiais conforme sua composição. A versão mais atual da NBR 15116 (ABNT, 2021a) define os agregados reciclados como material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção classe A (classificação da resolução nº 307 do CONAMA) e os subdivide em três categorias conforme o tipo de resíduo predominante:

- [1] ARCO* – agregado reciclado de concreto, constituído predominantemente por resíduos de concreto;
- [2] ARCI* – agregado reciclado cimentício, constituído predominantemente por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha;
- [3] ARM – agregado reciclado misto, constituído por uma mistura de materiais cimentícios (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.) e materiais cerâmicos (blocos e telhas de cerâmica vermelha etc.).

Além disso, a norma também especifica requisitos e recomendações para aceitação dos agregados reciclados e uso como insumos em compósitos cimentícios (concretos de cimento Portland, com e sem função estrutural, artefatos pré-fabricados, argamassas e similares). Esses requisitos e recomendações são apresentados na Tabela 1.

* Para simplificar a terminologia usada no trabalho, o termo ARC será adotado como referência comum para ambos ARCO e ARCI.

Tabela 1 – Requisitos e recomendações normativas para agregados reciclados usados em compósitos cimentícios

Característica requisitada		Limite para aceitação	Norma
Materiais indesejáveis ^{a b}	Teor	< 1	NBR 15116
Argila em torrões	Teor	< 3	NBR 7211
Sulfatos	Teor	< 0,1	NBR 7211
Cloretos	Teor para concreto simples	< 0,2	NBR 7211
	Teor para concreto armado	< 0,1	
	Teor para concreto protendido	< 0,01	
Absorção de água	Classe ARCO	< 7	NBR 15116
	Classe ARCI ou ARM	< 12	NBR 15116
Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12	NBR 7211
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10	
Característica recomendada		Limite sugerido	Norma
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida ^a	Classe ARCO	0%	NBR 15116
	Classe ARCI	< 10%	
	Classe ARM	< 40%	
Granulometria	Agregado graúdo	4,75/12,5 mm	NBR 7211
		9,5/25 mm	
		19/31,5 mm	
		25/50 mm	
	Agregado miúdo	Zona utilizável	NBR 7211
		Zona ótima	

^a Fragmentos que o agregado reciclado pode ou não conter

^b São considerados materiais indesejáveis os fragmentos de natureza orgânica, como madeiras, plástico, betume e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso

Fonte: Adaptado de NBR 15116 (ABNT, 2021a)

Tipicamente, o processo de reciclagem de RCD inclui dois estágios de britagem, rastreamento, peneiramento e remoção de impurezas (PACHECO-TORGAL; DING, 2013). Os agregados reciclados de concreto (ARC) são obtidos a partir da trituração de resíduos de demolição de concreto, geralmente através do processo de britagem em dois estágios, usando o triturador de impacto ou de mandíbula (GÜNEYISI *et. al.*, 2014).

No processo de britagem em dois estágios os resíduos de concreto são mecanicamente quebrados em fragmentos pequenos; depois, esses fragmentos são novamente triturados e, então, frações de diferentes tamanhos são rastreadas e separadas por peneiramento para obtenção dos agregados (DE BRITO; SAIKIA, 2012). A partir desse processo de britagem e separação são obtidos os agregados graúdos reciclados (AGR) e agregados miúdos reciclados (AMR) (TANG *et. al.*, 2020).

O processo de remoção de impurezas é necessário porque o entulho de concreto, geralmente, é contaminado com argamassa, gesso e pequenas quantidades de outras substâncias como madeira, plásticos, metais e vidro. Essas impurezas têm vários efeitos deletérios e, portanto, devem ser removidas porque podem causar efeitos adversos na qualidade do agregado e são inapropriadas para a produção de concreto (DE BRITO; SAIKIA, 2012; PACHECO-TORGAL; DING, 2013). Para tanto, são usadas máquinas de separação por vento para remover os materiais leves, como plástico e madeira, e técnicas de triagem magnética para remover os resíduos metálicos (YOUCAI; SHENG, 2017).

Segundo González-Taboada *et. al.* (2016), a composição dos ARC depende das características originais do concreto que deu origem ao agregado, do processo de reciclagem e da fração granulométrica obtida. Por serem derivados de resíduos de concreto, as partículas de ARC são compostas por uma camada de argamassa endurecida aderida à superfície do agregado original (GESOGLU *et. al.*, 2015), conforme exemplo apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Partícula de agregado reciclado de concreto (ARC)



Fonte: O autor (2022)

Principalmente devido à essa camada residual de argamassa é que as propriedades dos ARC geralmente diferem das propriedades dos AN (GÜNEYISI, 2014). A quantidade e a qualidade da argamassa antiga que fica aderida à superfície do ARC afetam diretamente as suas propriedades físicas, pois é caracterizada como mais porosa (ETXEBERRIA *et. al.*, 2007; PADMINI; RAMAMURTHY; MATHEWS, 2009) e apresenta inúmeras microfissuras (TAM; GAO; TAM, 2005).

Por esse motivo, comparado aos AN, geralmente a qualidade dos ARC é inferior, pois são caracterizados por ter elevada porosidade; conseqüentemente são agregados com alta capacidade de absorção de água e resistência mecânica e densidade mais baixas (TAM; GAO; TAM, 2005; UYGUNOĞLU; TOPÇU; ÇELIK, 2014; GESOGLU *et. al.*, 2015; KEBAILI *et. al.*, 2015; GONZÁLEZ-TABOADA *et. al.*, 2016; BAHRAMI *et. al.*, 2020).

Alguns dados encontrados na literatura sobre a absorção de água e a densidade de ARC são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de absorção e densidade de ARC encontrados em estudos da literatura

Referência	Absorção (%)			Densidade (g/cm ³)		
	AN	ARC	% aumento	AN	ARC	% redução
Agregados graúdos						
Corinaldesi e Moriconi (2011)	2,00	6,00	200,0%	2,68	2,37	11,6%
Gesoglu <i>et. al.</i> (2015)	0,50	7,40	1380,0%	2,62	2,15	17,9%
Kebaïli <i>et. al.</i> (2015)	1,00	5,10	410,0%	2,72	2,40	11,8%
Güneyisi <i>et. al.</i> (2016)	0,45	7,00	1455,6%	2,66	2,26	15,0%
Silva <i>et. al.</i> (2016)	2,01	7,28	262,2%	2,70	2,40	11,1%
González-Taboada <i>et. al.</i> (2017a)	1,12	6,96	521,4%	2,40	2,10	12,5%
Salesa <i>et. al.</i> (2017)	2,20	4,40	100,0%	2,54	2,26	11,0%
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	0,50	4,78	856,0%	2,67	2,50	6,4%
Fiol <i>et. al.</i> (2018)	1,16	4,15	257,8%	2,61	2,41	7,7%
Singh e Singh B. (2018)	0,60	3,84	540,0%	2,56	2,34	8,6%
Singh, Mithulraj e Arya (2019)	0,68	5,65	730,9%	2,56	2,34	8,6%
Nili, Sasanipour e Aslani (2019)	1,21	5,04	316,5%	2,54	2,38	6,3%
Rajhans <i>et. al.</i> (2019)	0,45	2,33	417,8%	2,64	2,44	7,6%
Omrane e Rabehi (2020)	1,60	6,70	318,8%	2,66	2,52	5,3%
Bahrami <i>et. al.</i> (2020)	2,65	7,10	167,9%	2,63	2,42	8,0%
Mohammed e Najim (2020)	0,68	2,01	195,6%	2,64	2,42	8,3%
Agregados miúdos						
Corinaldesi e Moriconi (2011)	3,00	10,0	233,3%	2,63	2,42	8,0%
Gesoglu <i>et. al.</i> (2015)	2,10	10,9	419,0%	2,65	2,43	8,0%
Güneyisi <i>et. al.</i> (2016)	0,55	12,8	2227,3%	2,64	2,42	8,3%
Nili, Sasanipour e Aslani (2019)	3,70	7,76	109,7%	2,56	2,34	8,6%
Omrane e Rabehi (2020)	0,75	9,00	1100,0%	2,66	2,33	12,2%
Mohammed e Najim (2020)	0,80	6,53	716,3%	2,70	2,48	8,1%
Bahrami <i>et. al.</i> (2020)	4,60	11,10	141,3%	-	-	-

LEGENDA: AN = Agregado Natural; ARC = Agregado Reciclado de Concreto

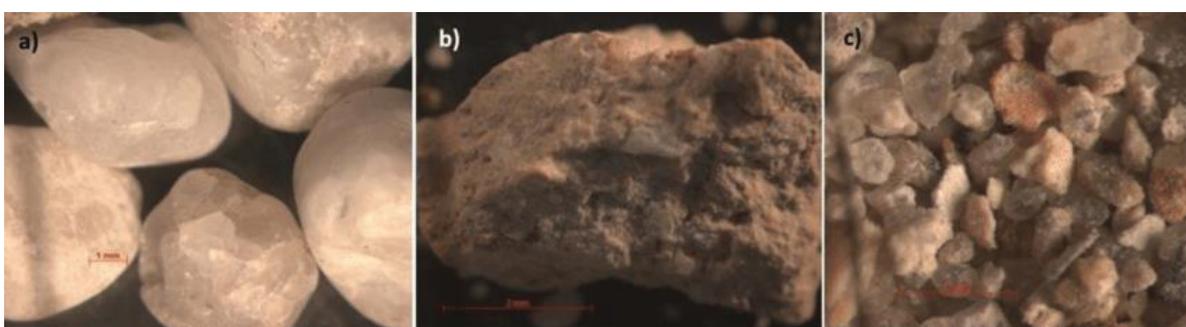
Fonte: O autor (2022)

Os dados apresentados evidenciam que há um aumento significativo da taxa de absorção de água e uma redução significativa da densidade dos ARC comparado aos AN. Também é válido notar que os valores de absorção e densidade dos ARC variam bastante de um estudo para outro. O que se deve, principalmente, por serem derivados de concretos com diferentes características.

Além das características de composição, em decorrência do processo de britagem os ARC também são caracterizados por ter formato mais angular, superfície mais rugosa e conter maior quantidade de partículas finas (KEBAİLİ *et. al.*, 2015; UYGUNOGLU, TOPCU E CELIK, 2014; GÜNEYISI *et. al.*, 2016; SILVA *et. al.*, 2016).

Comparando imagens de uma areia reciclada e de uma areia natural, apresentadas no trabalho de Leite e Lima (2021), é possível identificar que a areia reciclada tem uma superfície mais irregular e rugosa, mostrando a nítida diferença entre os dois materiais (Figura 7).

Figura 7 – Comparação de morfologia dos agregados naturais e reciclados. (a) grão natural; (b) grão reciclado; (c) presença de finos superficiais



Fonte: Leite e Lima (2021)

Em outra pesquisa, Ma *et. al.* (2021) estudaram as características morfológicas de agregados graúdos naturais e reciclados através de medidas coletadas em imagens digitais e os resultados obtidos mostraram que os ARC têm maior angularidade e rugosidade e menor esfericidade.

Mamirov (2022) ressaltam que é fundamental entender as diferenças de forma e textura entre os agregados reciclados e os naturais, bem como os fatores que causam essas diferenças (camada residual de argamassa), e é ainda mais importante considerar que a forma e a textura dos agregados influenciam significativamente no empacotamento de partículas.

2.1.3 Efeitos dos agregados reciclados em composições de CAA

As propriedades do concreto contendo ARC dependem amplamente do teor de argamassa do agregado reciclado, que por sua vez, depende da resistência do concreto original a partir do qual o ARC é derivado (THOMAS; THAICKAVIL E WILSON, 2018). A capacidade de absorção de água é uma das propriedades mais importantes que distinguem o ARC dos agregados naturais, e pode influenciar as propriedades do concreto, tanto no estado

fresco quanto no estado endurecido. Segundo Carro-López *et.al.* (2015) há uma relação negativa entre a absorção do agregado reciclado e a qualidade do concreto resultante. Os efeitos dos ARC em propriedades específicas do CAA são discutidos nas próximas subseções.

2.1.3.1 Propriedades do estado fresco

Geralmente, as propriedades do concreto no estado fresco, particularmente a trabalhabilidade, são afetadas pelo uso de ARC (AGRELA; ALAEJOS; DE JUAN, 2013). Na sequência, são discutidos os efeitos dos ARC nas propriedades do CAA em estado fresco.

- Fluidez e habilidade passante

A maioria das pesquisas envolvendo dosagem de CAA com incorporação de ARC exploram o uso das frações mais grossas (agregado graúdo). Os resultados desses estudos demonstram que a fluidez e a habilidade passante do CAA decrescem conforme a taxa de ARC aumenta. Na tabela 3 são apresentados resultados outros trabalhos que demonstram a redução das medidas de *slump-flow* e das medidas indicativas de habilidade passante.

Tabela 3 – Dados encontrados na literatura de *slump-flow* e habilidade passante de CAA dosados com ARC (continua)

Referência	Cimento (kg/m ³)	Tipo de ARC	% ARC	SF (mm) e Variação (%)	Anel J (mm)	H2/H1
Nili, Sasanipour e Aslani (2019)	385,0	AGR	0 100	765,0 745,0 (-2,6%)	9,0 2,0	- -
Rajhans <i>et. al.</i> (2019)	380,0	AGR	0 100	720,0 700,0 (-2,8%)	7,4 7,6	- -
Uygunoglu, Topcu e Celik (2014)	350,0	AGR	0 100	645,0 505,0 (-21,7%)	- -	- -
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	AGR	0 100	800,0 750,0 (-6,3%)	- -	0,91 0,95
Grdic <i>et. al.</i> (2010)	409,6	AGR	0 50 100	735,0 735,0 (0,0%) 725,0 (-1,4%)	- - -	0,94 0,95 0,98
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	300,0	AGR	0 20 40 60 100	760,0 729,0 (-4,1%) 709,0 (-6,7%) 685,0 (-9,9%)	7,5 8,4 8,8 9,2	- - - -
Fiol <i>et. al.</i> (2018)	290,0	AGR	0 20 50 100	780,0 700,0 (-10,0%) 580,0 (-26,0%) 650,0 (-17,0%)	- - - -	0,88 0,87 0,85 0,80

Tabela 3 – Dados encontrados na literatura de *slump-flow* e habilidade passante de CAA dosados com ARC
(conclusão)

Martinez-Garcia <i>et al.</i> (2020)	400,0	AGR	0 20 50 100	600,0 590,0 (+1,7%) 770,0 (+28,3%) 730,0 (+21,7%)	- - - -	- - - -
Kebaïli <i>et al.</i> (2015)	354,0	AGR	0 40 60 100	738,0 685,0 (-7,2%) 605,0 (-18,0%) 475,0 (-35,6%)	- - - -	0,80 0,10 0,00 0,00
Silva <i>et al.</i> (2016)	384,0	AGR	0 25 50 75 100	740,0 700,0 (-5,4%) 710,0 (-4,1%) 680,0 (-8,1%) 590,0 (-20,3%)	- - - - -	0,82 0,77 0,79 0,71 0,60
Bahrami <i>et al.</i> (2020)	400,0	AGR	0 25 50 75 100	670,0 655,0 (-2,2%) 623,0 (-7,0%) 603,0 (-10,0%) 587,0 (-12,4%)	- - - - -	0,93 0,87 0,83 0,81 0,80
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	AMR	0 100	800,0 700,0 (-12,5%)	- -	0,91 0,77
Nili, Sasanipour e Aslani (2019)	385,0	AMR	0 50	680,0 665,0 (-2,2%)	5,0 5,0	- -
Bahrami <i>et al.</i> (2020)	400,0	AMR	0 25 50 75 100	670,0 665,0 (-0,7%) 567,0 (-15,4%) 621,0 (-7,3%) 600,0 (-10,4%)	- - - - -	0,93 0,89 0,88 0,87 0,81
Kou e Poon (2009)	340,0	AGR + AMR	100 + 0 100 + 25 100 + 50 100 + 75 100 + 100	760,0 765,0 (+0,7%) 775,0 (+2,0%) 785,0 (+3,3%) 795,0 (+4,6%)	- - - - -	0,85 0,87 0,90 0,91 0,93
Nili, Sasanipour e Aslani (2019)	385,0	AGR + AMR	0 100 + 50	765,0 715,0 (-6,5%)	9,0 8,0	- -

LEGENDA: AGR = Agregado Reciclado Graúdo; AMR = Agregado Reciclado Miúdo;
SF = Slump-Flow; H1/H1 = Taxa entre a altura 2 e altura 1 do ensaio de Caixa L.

Fonte: O autor (2022)

A partir dos resultados apresentados, nota-se que, exceto nos trabalhos de Martinez-Garcia *et. al.* (2020) e Kou e Poon (2009), as medidas de *slump-flow* decrescem conforme a taxa de ARC aumenta. Esse padrão ocorre tanto para misturas produzidas com AGR em substituição à brita natural quanto em misturas que contêm AMR em substituição à areia natural.

Observa-se por exemplo que, para taxas de 100% de substituição de AGR, a redução do espalhamento pode, inclusive, ser superior à 20% (UYGUNOGLU; TOPCU; CELIK, 2014; KEBAILI *et. al.*, 2015; SILVA *et. al.*, 2016). Outros estudos demonstram que também há redução do espalhamento em função do aumento da taxa de AMR. Porém, no estudo de Bahrami *et. al.* (2020), para as taxas de substituição de 75% e 100% essa redução foi menos expressiva nas misturas contendo AMR do que nas misturas contendo AGR.

Em função da alta capacidade de absorção do ARC, as misturas de CAA produzidas com esse tipo de agregado demandam maior quantidade de água ou maior teor de aditivo redutor de água para manter o grau de fluidez (GRDIC *et. al.*, 2010). Ocorre que, parte da água de amassamento é absorvida pelo ARC, resultando, na perda de fluidez. Outra adversidade é que a camada residual de argamassa aderida à superfície do agregado causa maior atrito interno entre as partículas da nova mistura; por isso, na medida em que a taxa de substituição de ARC aumenta, a trabalhabilidade do concreto diminui (THOMAS; THAICKAVIL; WILSON, 2018).

Acrescenta-se, ainda, que a forma e a textura das partículas dos ARC também influenciam na trabalhabilidade do concreto. Reconhecendo as dificuldades de se obter um concreto com capacidade autoadensável sob certas condições de uso do ARC, Kebaïli *et. al.* (2015) conduziram uma pesquisa experimental para investigar os efeitos adversos causados pela substituição de AGN por AGN nas propriedades de autoadensibilidade da mistura. A partir dos resultados foi verificado que, o aumento da taxa de ARC dos concretos levou à diminuição do *slump-flow* devido ao aumento da tensão de escoamento da mistura. Para os autores, esse efeito é causado pelo aumento do número de partículas e consequentemente da área superficial da mistura devido ao formato angular e a textura rugosa dos agregados reciclados.

Conforme mencionado anteriormente (tópico 2.1.2), outra característica dos ARC é a maior quantidade de partículas finas devido ao processo de britagem (SILVA *et. al.*, 2016; GONZÁLEZ-TABOADA *et. al.*, 2017a). Em razão dessa característica, concretos produzidos com esse material normalmente requerem maior consumo de cimento e de água do que

misturas com agregados naturais para atingir a mesma consistência (UYGUNOĞLU; TOPÇU; ÇELİK, 2014; SILVA *et. al.*, 2016).

Portanto, esse efeito deve ser compensado mediante aumento da relação a/c ou aumento do teor de superplastificante (TANG *et. al.*, 2020). A perda de fluidez pode ser mais acentuada se o ARC é incorporado à mistura em estado seco. Logo, para prevenir esse efeito, alguns pesquisadores têm optado por incorporar o ARC em condição de pré-saturação (GESOGLU *et. al.*, 2015; GÜNEYISI *et. al.*, 2016). Outras técnicas especiais de mistura e tratamento dos ARC para contornar esse problema são apresentadas no tópico 2.1.4.

Composições contendo AGR e AMR também são afetadas pela redução do *slump-flow*. Aslani *et. al.* (2018) produziram uma série com cinco composições de CAA, nas quais os agregados naturais, grãos e miúdos, foram substituídos por agregados reciclados nas taxas de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%, em volume. A adição de 10% de AGR e 10% de AMR não resultou em alteração do *slump-flow*, porém, aumentando a taxa de substituição para 20%, 30% e 40%, houve reduções de 6,8%, 8,7% e 10,1%. Em outro estudo Nili *et. al.* (2019) observaram 6,5% de redução na medida de abatimento do CAA com 100% de AGR e 50% de AMR.

Em alguns casos excepcionais o aumento da taxa de ARC não resultou na redução proporcional do espalhamento, como no estudo de Fiol *et. al.* (2018), ou até mesmo houve aumento do abatimento para determinadas taxas de ARC devido ao acréscimo gradual do consumo de superplastificante, como no estudo de Martinez-Garcia *et. al.* (2020).

De maneira semelhante, Kou e Poon (2009) também variaram dois parâmetros da dosagem para investigar composições mistas com 100% de AGR e taxas variadas de substituição de AMR. Conforme o teor de agregado reciclado fino aumentou, mais água foi adicionada para compensar a maior capacidade de absorção do AMR (que foi incorporado em estado seco), o que resultou em maiores medidas de espalhamento para as maiores taxas de areia reciclada.

Quanto à habilidade passante, observa-se na Tabela 4 que, na medida em que a taxa de ARC incorporada na mistura cresce, há aumento da diferença de diâmetro medida pelo ensaio do Anel J (ABNT NBR 15823-3, 2017c) e diminuição da taxa H2/H1, medida pelo ensaio da caixa L (ABNT NBR 15823-4, 2017d). Esses dois resultados indicam que, com a incorporação de ARC, há redução da habilidade passante do CAA.

Nos estudos de Kebaïli *et. al.* (2015) e Silva *et. al.* (2016) os resultados foram mais críticos para as misturas contendo mais de 50% de AGR, pois as taxas H2/H1 foram inferiores aos limites mínimos normativos de 0,80 pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e 0,75 pela

EFNARC (2005). Especificamente no estudo de Kebaïli *et. al.* (2015), para o CAA com 60% de AGR, a mistura não fluiu completamente dentro da seção horizontal da Caixa L e para o CAA com 100% de AGR, a mistura permaneceu bloqueada dentro da seção vertical, resultando em uma taxa H2/H1 igual a zero em ambas.

Kebaïli *et. al.* (2015) explicam que o efeito adverso do ARC na habilidade passante do CAA é agravado pelo maior número de partículas contidas no volume de agregado gráudo. Conforme relatado por Okamura e Ouchi (2003), a frequência de colisão e contato entre as partículas de agregado aumenta na medida em que a distância relativa entre as partículas diminui, e a energia requerida para promover o fluxo da mistura é consumida pelo aumento da tensão interna, resultando no bloqueio de partículas do agregado.

De acordo com resultados da literatura, a incorporação combinada de AGR e AMR também influencia negativamente na habilidade passante do CAA. Aslani *et. al.* (2018) identificaram que os agregados reciclados tiveram um impacto mais significativo na capacidade de habilidade passante do que na fluidez. Enquanto as medidas de *slump-flow* variaram de 690-600 mm, as medidas obtidas no ensaio do Anel J variaram de 650-500 mm. Para as taxas de 10%, 20%, 30% e 40% de ARC a redução no diâmetro do Anel-J variou de 3,1% a 23,1%. Segundo os autores, essa redução pode ser atribuída à maior dimensão do AGR (14 mm), enquanto o AN tinha 10 mm.

Novamente, no estudo de Güneyisi *et. al.* (2016) observou-se uma tendência oposta. A taxa de altura H2/H1, medida através do ensaio de caixa L, cresceu conforme aumento da taxa de areia reciclada, indicando maior habilidade passante. Os resultados desse estudo demonstram que a taxa de 50% de AGR resultou no melhor desempenho do CAA em relação à fluidez e à habilidade passante. Exemplificando, dentre as três séries, as misturas com 50% de AGR obtiveram as maiores medidas de *slump-flow* para até 75% de substituição de areia natural e, no geral, também obteve os maiores resultados da taxa H2/H1.

- Viscosidade e resistência à segregação

Resultados de viscosidade e resistência à segregação relatados em alguns estudos da literatura são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo de resultados de viscosidade e resistência à segregação de CAA dosados com ARC
(continua)

Referência	Cimento (kg/m ³)	ARC	% ARC	T500 (s)	Funil V (s)	Taxa de segregação (%)
Grdic <i>et. al.</i> (2010)	409,6	AGR	0	5,60	-	11,7
			50	5,40		9,31
			100	6,00		5,20
Fiol <i>et. al.</i> (2018)	290,0	AGR	0	3,0	5,0	-
			20	5,0	6,0	-
			50	6,0	10,0	-
			100	6,0	19,0	-
González-Taboada <i>et. al.</i> (2017b)	400,0	AGR	0	1,5 (*)	23,0 (*)	13,5 (*)
			20	2,0 (*)	25,5 (*)	13,0 (*)
			50	2,4 (*)	31,0 (*)	11,5 (*)
			100	4,0 (*)	34,0 (*)	3,00 (*)
Kebaili <i>et. al.</i> (2015)	354,0	AGR	0	2,50	-	9,0
			40	2,40	-	2,0
			60	2,90	-	1,0
			100	- (*)	-	1,0
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	300,0	AGR	0	3,0	7,3	-
			20	4,0	7,5	-
			40	4,0	8,2	-
			60	5,0	8,4	-
			100	5,0	9,6	-
Silva <i>et. al.</i> (2016)	384,0	AGR	0	1,83	4,28	-
			25	2,21	6,26	-
			50	2,18	14,8	-
			75	2,21	17,5	-
			100	3,64	24,88	-
Bahrami <i>et. al.</i> (2020)	400,0	AGR	0	4,11	10,32	-
			25	4,96	11,93	-
			50	7,65	15,42	-
			75	11,23	21,45	-
			100	13,50	31,70	-
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	AMR	0	1,00	-	-
			100	1,00	-	-
Nili <i>et. al.</i> (2019)	385,0	AMR	0	2,00	-	-
			50	3,00	-	-
Bahrami <i>et. al.</i> (2020)	400,0	AMR	0	4,11	10,32	-
			25	4,80	11,80	-
			50	7,11	13,69	-
			75	10,1	20,11	-
			100	12,0	29,30	-

Tabela 4 – Resumo de resultados de viscosidade e resistência à segregação de CAA dosados com ARC (conclusão)

Kou e Poon (2009)	340,0	AGR + AMR	100 + 0	-	-	8,90
			100 + 25	-	-	9,10
			100 + 50	-	-	9,50
			100 + 75	-	-	10,3
			100 + 100	-	-	11,1
Aslani <i>et. al.</i> (2018)	180,0	AGR + AMR	0 + 0	1,97	-	-
			10 + 10	2,06	-	-
			20 + 20	2,37	-	-
			30 + 30	2,04	-	-
			40 + 40	2,95	-	-
Nili <i>et. al.</i> (2019)	385,0	AGR + AMR	0 + 0	2,0	-	-
			100 + 50	2,0	-	-

LEGENDA: ARC = Agregado Reciclado de Concreto; AGR = Agregado Reciclado Graúdo; AMR = Agregado Reciclado Miúdo.

NOTA: (*) Valor estimado através de gráfico apresentado no artigo.

Fonte: O autor (2022)

Observa-se que a incorporação de ARC aumenta a viscosidade do CAA, determinada pelo tempo T500 no ensaio de *slump-flow* (ABNT NBR 15823-2, 2017b), e pelo tempo medido no ensaio de Funil V (ABNT NBR 15823-5, 2017e). A exemplo, conforme apresentado na Tabela 4, Silva *et. al.* (2016) identificaram aumento de 21 a 99% nos resultados de T500 para as composições com AGR. O aumento do tempo do ensaio de Funil V foi ainda maior, variando de 46 a 481%, sendo que, o tempo medido para composição com 100% de AGR foi de quase 25 segundos, que o é limite máximo recomendado pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Bahrami *et. al.* (2020) também observaram aumentos expressivos nos resultados de viscosidade testando misturas de CAA com AMR. Os resultados obtidos nos dois ensaios para as taxas de substituição de 75% e 100% chegam a ser o dobro do tempo medido para o concreto de referência (100% de agregado natural).

Opostamente, Güneyisi *et. al.* (2016) investigaram composições de CAA combinando o uso de AGR e AMR, e observaram uma tendência de decréscimo dos tempos medidos no ensaio do *slump-flow* (T500) e do Funil V conforme o aumento da taxa de ARC. Para taxas de 50% e 100% de AGR a redução do T500 foi muito maior quando a areia reciclada foi incorporada à uma taxa acima de 75%. Em relação aos resultados do ensaio de

Funil V, as misturas com 100% de AGR e areia reciclada resultaram nos tempos mais baixos para todas as taxas de substituição de AMR. Já na série com 50% de AGR o tempo de fluxo do Funil V foi relativamente maior para as misturas com 75% e 100% de areia reciclada.

Observa-se que a maioria dos estudos referenciados na tabela 5 sugerem que a incorporação de AGR no CAA tem um efeito positivo na estabilidade da mistura. Conforme explicado no item 2.1.1, a resistência à segregação do CAA é governada, principalmente pela viscosidade plástica da mistura. Por esse motivo, na mesma medida em que o uso de ARC aumenta a viscosidade das misturas de concreto, positivamente diminui o risco de segregação.

Segundo Corinaldesi e Moriconi (2011) há um intervalo crítico das propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade plástica) no qual a segregação é minimizada e para agregados com menor densidade, como os agregados reciclados, esse intervalo é mais amplo. Isso porque para a máxima resistência à segregação, a tensão de escoamento deve ser alta e a diferença de densidade entre os agregados e a pasta deve ser baixa.

Ao contrário das outras três referências listadas na tabela, no experimento de Kou e Poon (2009) a segregação do CAA aumentou proporcionalmente à taxa de areia reciclada. O aumento da segregação em função da taxa de AMR também ocorreu pelo mesmo motivo do aumento das medidas de *slump-flow*, conforme comentado anteriormente. Devido à alta capacidade de absorção da areia reciclada, quanto maior o percentual de substituição, maior quantidade de água foi adicionada à mistura, o que resulta em maior risco de segregação.

- Densidade no estado fresco

Dado que a massa específica dos ARC costuma ser mais baixa do que a densidade de AN, em decorrência da porosidade da camada de argamassa residual, é esperado que haja uma redução da densidade de misturas de CAA em taxa de substituição de ARC (GRDIC *et. al.*, 2010). Silva, De Brito e Dhir (2018) realizam um estudo de revisão da literatura avaliando o desempenho de CCV e CAA dosados com ARC no estado fresco. Reunindo resultados de vários estudos, eles observaram que a magnitude dessa redução é relacionada à porosidade do ARC; aqueles com menor massa unitária e maior capacidade de absorção de água, resultam em menor densidade do CAA (decréscimo entre 5% e 8%).

Uygunoğlu, Topçu e Çelik (2014) observaram reduções de 3,45%, 4,66%, 5,15% e 5,50% na densidade de quatro misturas de CAA com 100% de AGR e relação a/c variada. Grdic *et. al.* (2010) investigaram duas composições de CAA com 50% e 100% de AGR e identificaram redução de 1,0% e 1,5%, respectivamente, em relação à mistura com 100% de

AN. González-Taboada *et. al.* (2017c) produziram composições de CAA por diferentes métodos de mistura e obtiveram as seguintes taxas de redução da densidade: 0,47% – 1,24% na composição com 20% de AGR, 1,62% – 1,97% na composição com 50% de AGR e 3,41% – 4,62% para o CAA com 100% de AGR.

Güneyis *et.al.* (2016) estudaram composições mistas de CAA com AGR e AMR, variando as taxas de substituição de AGR em 0%, 50% e 100% e as taxas de AMR em 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os resultados mostram que a densidade fresca das misturas de CAA diminuiu gradualmente em função do aumento das taxas de substituição de AMR e AGR. Por exemplo, avaliando as composições com 75% de AMR, para as taxas de 0%, 50% e 100% de substituição de AGR, os decréscimos foram de 3,2%, 5,3% e 7,4%, respectivamente, em relação à mistura de controle (100% de AN).

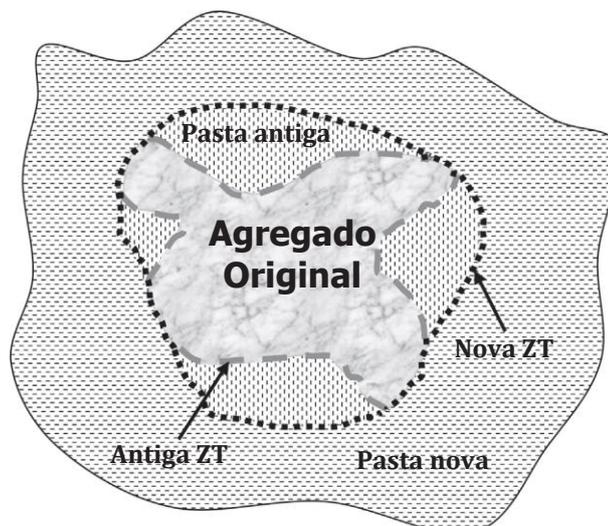
Kou e Poon (2009) também identificaram redução da densidade de misturas de CAA contendo 100% de AGR e areia reciclada em taxas variadas (25%, 50%, 75% e 100%). Comparada à mistura de controle (100% de AN) que apresentou densidade de 2220 kg/m³, para taxas de 25% e 50% a densidade reduziu em 0,5% e 0,9%, respectivamente, e para as taxas de 75% e 100% a redução foi de 1,8% e 2,3%.

2.1.3.2 Microestrutura

Sabe-se que, geralmente, o elo mais fraco do concreto convencional é a zona de transição na interface entre a matriz de cimento e os agregados, e, portanto, é a fase limitante da resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Diferente de concretos produzidos com agregados naturais, em concretos com ARC, a zonas de transição (ZT) se divide em duas interfaces de contato: (1) a zona entre a partícula do ARC e a nova camada de argamassa; e (2) a zona do concreto antigo, que deu origem ao ARC, entre a partícula virgem do agregado a camada de argamassa residual (POON *et. al.*, 2004; GÜNEYISI *et. al.*, 2014; GESOGLU *et. al.*, 2015; ASLANI *et. al.*, 2018).

Como resultado, a estrutura de concretos produzidos com ARC tem um comportamento mais complexo comparado a concretos convencionais (GÜNEYISI *et. al.*, 2014). Na Figura 8 é apresentada uma ilustração da microestrutura de um concreto com ARC.

Figura 8 – Interfaces dos agregados reciclados de concreto (ARC)



Fonte: Adaptado de Kisku *et. al.* (2017)

As duas ZT do concreto com ARC têm características que pode influenciar nas propriedades do concreto de modos distintos (LEITE; MONTEIRO, 2015). Uma das abordagens defendidas pelos pesquisadores é que a porosidade e as microfissuras da antiga ZT do ARC causam aumento da demanda de água da mistura do novo concreto produzido com esse tipo de agregado, o que torna sua microestrutura mais porosa e menos resistente (POON; SHUI, LAM, 2004; LEITE; MONTEIRO, 2015).

Esse efeito ocorre porque a camada de argamassa aderida à superfície do agregado tende a absorver grande quantidade de água durante o estágio inicial da mistura de concreto, o que reduz a quantidade disponível para hidratar os compostos do cimento, prejudicando o processo de hidratação e resultando na formação de uma ZT mais porosa (POON; SHUI; LAM, 2004; TAM, GAO; TAM, 2005).

Poon, Shui, Lam (2004) conduziram uma investigação da microestrutura de três CCV produzidos com diferentes tipos de agregados por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os três CCV foram produzidos com agregado natural obtido da britagem de granito, agregado reciclado de concreto de resistência normal e agregado reciclado de concreto de alta resistência, respectivamente. Dentre as três composições de CCV estudadas, o concreto com ARC derivado de concreto de alta resistência apresentou ZT comparavelmente mais densa do que os outros dois (POON; SHUI; LAM, 2004).

De acordo com os pesquisadores, esse resultado pode ser atribuído ao mecanismo de hidratação que ocorreu. Eles explicam que ARC derivado do concreto de alta resistência tinha um teor de umidade inicial moderado, e que, por esse motivo, pode ter absorvido certa

quantidade da água livre na idade prematura de hidratação, diminuindo a relação a/c inicial na ZT. Isso contribuiu para que produtos recém-hidratados gradualmente preenchessem a interface da ZT, melhorando efetivamente a interface de ligação entre o agregado e a matriz de cimento (POON; SHUI; LAM, 2004).

Apesar de haver resultados que demonstram que a ZT de concretos produzidos com ARC é mais porosa, as imagens de microscopia do estudo de Etxeberria, Vázquez e Marí (2005) demonstram que a ZT dos concretos produzidos com ARC é eficaz. Foram investigadas quatro misturas de CCV com 0%, 25%, 50% e 100% de AGR e as imagens da interface dos concretos demonstram que uma quantidade de cimento fica acumulada na interface, o que contribuiu para produzir uma pasta densa, com baixa relação a/c. Adicionalmente, nas imagens de ruptura das amostras observou-se que a fratura do concreto com ARC ocorreu através do agregado e não através da nova ZT, como normalmente ocorre em concretos convencionais. Tal resultado sugere que o ponto mais fraco de concretos com ARC é o próprio ARC, através da antiga ZT.

Segundo Leite e Monteiro (2015), há pesquisadores que defendem que essa água absorvida possa ajudar no processo de hidratação em idades mais avançadas pois o ARC poderia promover a cura interna do concreto e densificar a ZT. Conforme comentado mais adiante, os experimentos de Fakitsas *et. al.* (2012) e Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014) são exemplos de estudos que confirmam essa hipótese.

Em razão desse mecanismo de hidratação existe certa similaridade entre a microestrutura de concretos com agregados reciclados e a microestrutura de concretos leves. Se os agregados são mais porosos, podem armazenar água e promover a cura interna posteriormente (POON; SHUI; LAM, 2004).

Djerbi (2018) também identificaram um resultado satisfatório observando a microestrutura de concretos dosados com ARC. O pesquisador estudou concretos produzidos com três tipos de AGR, de diferentes classes de resistência (ARC25, ARC30 e ARC45), variando a taxa de substituição em 0%, 30% e 100%. As imagens mostraram uma mesma tendência nos três concretos com 100% de AGR: um perfil de porosidade mais elevada do que os concretos de referência (com AN), porém com menos produtos anidros. Segundo os autores, isso ocorre devido à liberação de água do ARC para a pasta do novo concreto, o que contribui para a hidratação dos compostos de cimento, ou seja, reduz a quantidade de partículas anidras, porém, aumenta a relação a/c na região.

2.1.3.3 Propriedades mecânicas

Há um consenso na literatura de que as propriedades mecânicas do concreto, como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, são adversamente afetadas com a incorporação de ARC (GESOGLU *et. al.*, 2015; SILVA *et. al.*, 2016; RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018; BAHRAMI *et.al.*, 2020).

Na Tabela 5 são apresentados resultados de pesquisas que avaliaram essas propriedades. Para cada estudo são informados os valores de resistência dos concretos avaliados (em MPa) e os percentuais de redução da resistência conforme as taxas de substituição dos AN por ARC.

Tabela 5 – Resumo de resultados de resistência mecânica de CAA dosados com ARC

(continua)

Referência	Cimento (kg/m ³)	a/c	ARC	% ARC	Compressão % de redução	Tração % de redução	Módulo de Elasticidade % de redução
Gesoglu <i>et. al.</i> (2015)	312,0	0,66	AGR	0	72,5	3,8	25,0
				100	63,8 (-11,8%)	3,2 (-13,6%)	21,4 (-14,2%)
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	0,45	AGR	0	44,0 (*)	-	-
				100	38,0 (-13,6%) (*)	-	-
Nili <i>et. al.</i> (2019)	418,0	0,44	AGR	0	46,4	4,3	-
				100	52,9 (+14,0%)	4,1 (-4,7%)	-
Grdic <i>et. al.</i> (2010)	409,6	0,41	AGR	0	49,80 (*)	7,25 (*)	-
				50	47,9 (-3,9%)	7,1 (-2,5%)	-
				100	45,5 (-8,6%)	6,2 (-13,9%)	-
Carro-López <i>et. al.</i> (2015)	400,0	0,46	AGR	0	82,0	-	-
				20	75,0 (-8,5%)	-	-
				50	59,0 (-28,0%)	-	-
				100	42,0 (-48,8%)	-	-
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	300,0	0,65	AGR	0	38,3	3,0	32,9
				20	37,1 (-3,1%)	3,0 (-1,6%)	31,8 (-3,5%)
				40	36,0 (-6,0%)	2,6 (-14,6%)	31,5 (-4,3%)
				60	35,2 (-8,1%)	2,4 (-23,9%)	31,0 (-5,8%)
		0,67	100	34,0 (-11,2%)	2,3 (-25,6%)	30,7 (-6,7%)	
Bahrami <i>et. al.</i> (2020)	400,0	0,42	AGR	0	39,0	3,6	-
				25	37,0 (-5,1%)	3,5 (-1,7%)	-
				50	33,5 (-14,1%)	3,4 (-6,4%)	-
				75	31,4 (-19,6%)	2,8 (-23,5%)	-
				100	32,1 (-17,6%)	2,5 (-31,9%)	-

Tabela 5 – Resumo de resultados de resistência mecânica de CAA dosados com ARC

(conclusão)

Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	0,45	AMR	0 100	44,0 (*) 29,5 (-33,0%)	-	-
Gesoglu et. al. (2015)	312,0	0,66	AMR	0 100	72,5 61,0 (-15,8%)	3,8 2,8 (-25,1%)	25,0 18,9 (-24,6%)
Nili et. al. (2019)	418,0	0,44	AMR	0 50	46,4 32,5 (-30,0%)	4,30 2,9 (-32,6%)	- -
Bahrani et. al. (2020)	400,0	0,42	AMR	0 25 50 75 100	39,0 36,7 (-5,9%) 32,8 (-15,9%) 29,6 (-24,1%) 24,8 (-36,4%)	3,6 3,4 (-4,4%) 3,2 (-10,8%) 2,7 (-25,2%) 2,5 (-30,7%)	- - - - -
Gesoglu et. al. (2015)	312,0	0,66	AGR + AMR	0 100 + 100	72,5 52,9 (-27,0%)	3,75 2,6 (-30,9%)	24,99 16,9 (-32,3%)
Nili et. al. (2019)	418,0	0,44	AGR + AMR	0 100 + 50	46,4 31,8 (-31,5%)	4,30 3,1 (-27,9%)	- -
Aslani et. al. (2018)	180,0	-	AGR + AMR	0 10 + 10 20 + 20 30 + 30 40 + 40	50,4 47,7 (-5,3%) 46,0 (-8,6%) 45,1 (-10,4%) 43,9 (-13,0%)	3,70 4,4 (+18,4%) 3,9 (+ 7,6%) 3,8 (+ 2,4%) 3,8 (+ 2,7%)	- - - - -
Kou e Poon (2009)	340,0	0,53	AGR + AMR	100 + 0 100 + 25 100 + 50 100 + 75 100 + 100	44,30 44,5 (+ 0,5%) 43,4 (-2,0%) 41,3 (-6,8%) 38,7 (-12,6%)	2,90 (*) 2,7 (-6,9%) 2,7 (-6,90%) 2,6 (-10,3%) 2,5 (-13,8%)	- - - - -

LEGENDA: AGR = Agregado Graúdo Reciclado; AMR = Agregado Miúdo Reciclado;**NOTA:** (*) Valor estimado a partir de resultados apresentados em gráfico.

Fonte: O autor (2022)

Os resultados evidenciam que a resistência mecânica dos CAA decresce gradualmente com o aumento da taxa de ARC. Pode-se notar que, alguns resultados revelam que taxas mais baixas de AGR (até 50%) não influenciam significativamente na resistência à compressão, na resistência à tração e no módulo de elasticidade (GRDIC *et. al.*, 2010; RAJHANS, PANDA e NAYAK, 2018; BAHRAMI *et. al.*, 2020).

Outros resultados mostram que mesmo para 100% de substituição, a diminuição da resistência à compressão é inferior à 15% (GRDIC *et. al.*, 2010; GESOGLU *et. al.*, 2015); RAJHANS, PANDA e NAYAK, 2018). Para taxas de substituição de AGR superiores à 50%,

o decréscimo da resistência à tração é ainda maior do que a redução da resistência à compressão.

De modo geral, os resultados apresentados indicam que o decréscimo da resistência mecânica é mais acentuado para os concretos com AMR em substituição à areia natural. Em relação ao efeito do uso combinado de AMR e AGR, nota-se a mesma tendência de redução da resistência mecânica com o aumento da taxa de ARC, com exceção dos resultados de resistência à tração encontrados por Aslani *et. al.* (2018). Os resultados obtidos por Gesoglu *et. al.* (2015) demonstram que a série de CAA produzidos com 100% de AGR e 100% de AMN obteve melhor desempenho tanto comparada à série de CAA dosado somente com areia reciclada (100% de AGN e 100% de AMR) quanto comparada à série de CAA dosada somente com agregado reciclado (100% de AGR e 100% de AMR).

Tang *et. al.* (2020) comentam que o efeito da incorporação de ARC nas propriedades mecânicas do CAA depende de diferentes parâmetros como a proporção da mistura e porcentagem de substituição do ARC, tamanho e qualidade do ARC e das adições suplementares. Independentemente, no geral, observa-se que, na medida em que a taxa de ARC aumenta, a resistência mecânica do concreto diminui.

Os motivos atribuídos à essa redução são, principalmente, as características das duas ZT: antiga ZT do ARC e nova ZT formada entre o ARC e a pasta de cimento do CAA. Devido aos poros e fissuras gerados na camada residual de argamassa do ARC durante o processo de britagem, o agregado contém alta capacidade de absorção de água e, portanto, menos água permanece disponível para o processo de hidratação do cimento (RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018). Com isso, conforme explicado anteriormente, a microestrutura do novo concreto é mais porosa e menos resistente (POON; SHUI; LAM, 2004).

Grdic *et al.* (2010) ressaltam que, mesmo para uma alta taxa de AGR (50-100%), o efeito nas propriedades mecânicas do CAA não é expressivo caso a qualidade do ARC seja satisfatória. Nesse sentido, há autores que sugerem o uso de ARC derivado de concretos de alta resistência, pois as propriedades do concreto produzido com esse tipo de agregado não diferem muito do concreto fabricado com AN (POON; SHUI; LAM, 2004; MWASHA; RAMNATH, 2018). Há também pesquisadores que defendem o uso de agregados reciclados obtidos a partir do processamento de resíduos de elementos pré-fabricados de concreto devido à melhor qualidade do ARC (FIOL *et. al.*, 2018; SALESA *et. al.*, 2017).

Particularmente, além das razões mencionadas acima, é válido ressaltar que o módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade dos materiais constituintes e, sobretudo, dos agregados; por esse motivo, a redução do módulo de elasticidade do CAA

causada pela incorporação de ARC ocorre porque o módulo do ARC é inferior ao dos AN (MOHAMMED; NAJIM, 2020).

Embora haja um padrão de redução da resistência mecânica em função da taxa de incorporação de ARC, há alguns casos particulares de concretos que apresentaram aumento da resistência à compressão com a incorporação de ARC (FAKITSAS *et. al.*; 2012; TUYAN; MARDANI-AGHABAGLOU; RAMYAR, 2014; SALESA *et. al.*; 2017; FIOL *et. al.*, 2018).

Dentre os motivos atribuídos a esse aumento, um deles é que a textura rugosa e a alta capacidade de absorção da camada de argamassa residual do ARC melhoram a ligação e o intertravamento entre a nova matriz de cimento e as partículas de ARC, o que resulta em uma ZT mais forte entre essas duas fases (ETXEBERRIA *et. al.*, 2007; TUYAN; MARDANI-AGHABAGLOU; RAMYAR, 2014; ABED *et. al.*, 2020).

Outro fator que pode causar aumento da resistência à compressão de concretos com ARC é o fenômeno de cura interna do concreto, promovido quando o ARC é introduzido à mistura em condição de saturação e superfície seca³ (FAKITSAS *et. al.*, 2012; TUYAN; MARDANI-AGHABAGLOU; RAMYAR, 2014). Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014) explicam que, devido à elevada capacidade de absorção do ARC, há uma probabilidade alta da água contida nos poros do ARC contribuir para a cura interna da ZT, fortalecendo-a. Coerentemente, os pesquisadores produziram misturas de CAA com 20%, 40%, 60% e 100% de AGR, introduzindo o ARC na mistura em condição de saturação e superfície seca e observaram um pequeno aumento, de 5,0 – 9,4%, na resistência à compressão de CAA aumentando a taxa de substituição de AGR de 0% para 40%.

Fakitsas *et. al.* (2012) também avaliaram o potencial de cura interna usando ARC em condição saturada para a produção de CAA e obtiveram resultados similares. Comparado ao CAA de referência (100% de AN), a incorporação de 100% de AGR resultou em aumento de 4,0% na resistência à compressão do CAA na idade de 28 dias e 7,6% na idade de 90 dias. Segundo os autores, o aumento é atribuído ao efeito de cura interna devido à capacidade de absorção e retenção do ARC.

Fiol *et. al.*, 2018 também constataram aumento de 1,8%, 13,3% e 15,6% na resistência à compressão de três misturas de CAA contendo 20%, 50% e 100% de AGR, porém os ARC foram incorporados às misturas em condição seca. Segundo os autores, quando o ARC é incorporado à mistura em condição seca, a relação a/c efetiva é reduzida pelo efeito de absorção do ARC, o que resulta no aumento da resistência à compressão. Em

³ Condição obtida após imersão do ARC em água, por tempo determinado, seguido da secagem da superfície (detalhes em 2.1.4.2)

relação à resistência à tração, os resultados das mesmas misturas diminuíram em 2,1%, 6,2% e 4,8%, respectivamente, com o aumento da taxa de AGR. Porém, é válido notar que os percentuais de redução são relativamente baixos comparado a outros valores da literatura.

Em outro estudo experimental, Salesa *et. al.* (2017) produziram uma composição de CAA com 100% de ARC obtido do processamento de resíduos de pré-moldados de concreto. Comparando com o CAA de referência (100% de AN), houve um aumento de 7,7% na resistência à compressão na idade de 28 dias. Segundo os autores esse aumento se deve à qualidade dos agregados reciclados que foram obtidos exclusivamente de peças de concreto pré-moldado, fabricadas para atender um padrão alto. Diferentemente, houve decréscimo de 11,2% no módulo de elasticidade, pois, conforme explicam os autores, é uma propriedade depende da deformabilidade dos materiais constituintes e que, portanto, é normal que ARC apresentem maior deformabilidade devido à camada de argamassa aderida.

O perfil de ruptura de amostras de CAA com ARC, submetidas à carga de compressão, também tem sido analisado por alguns pesquisadores. Gesoglu *et. al.* (2015) investigaram os aspectos visuais da ruptura de amostras de CAA após o ensaio de compressão e observaram que, nas amostras à base de agregados naturais, a ruptura ocorreu na pasta de cimento endurecida, enquanto em amostras de concreto com 100% de AGR e 100% de AMR a faixa de ruptura passou através da fase de agregado, pois são os componentes mais fracos. O concreto que deu origem ao ARC tinha resistência à compressão relativamente baixa: de quase 20 MPa.

Grdic *et. al.* (2010) identificaram o mesmo aspecto comparando duas amostras de CAA, com 50% e 100% de AGR, com uma terceira amostra de controle (100% de AN). Nili, Sasanipour e Aslani (2019) analisaram os padrões de ruptura de quatro corpos-de-prova de CAA, após teste de compressão, e observaram que, nas amostras contendo ARC o padrão das fissuras é vertical, enquanto o padrão de fissuras na amostra de referência é diagonal, com um ângulo aproximado de 45 graus. Os autores obtiveram a mesma conclusão, que em amostras de CAA contendo ARC, as fissuras atravessam o ARC.

2.1.3.4 Absorção de água

A incorporação de ARC também causa aumento da absorção de água do CAA no estado endurecido. Conforme apresentado na Tabela 6, resultados experimentais apresentados na literatura evidenciam esse efeito.

Tabela 6 – Resumo de absorção de água de CAA dosados com ARC

Referência	Cimento (kg/m ³)	a/c	Absorção ARC (%)	ARC	ARC (%)	Absorção CAA (%)
Salesa <i>et. al.</i> (2017)	390,0	0,50	4,40	AGR	0 100	6,9 11,6
Grdic <i>et. al.</i> (2010)	409,6	0,41	5,88	AGR	0 50 100	0,55 44,5 (*) 67,3 (*)
Fiol <i>et. al.</i> (2018)	250,0	0,45	4,15	AGR	0 20 50 100	3,3 3,0 14,8 24,2
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	315,0	0,62	4,80	AGR	0 20 40 60	2,4 8,3 (*) 20,8 (*) 29,2 (*)
Silva <i>et. al.</i> (2016)	384,0	0,56	7,28	AGR	0 25 50 75 100	6,13 12,6 16,2 17,8 35,9

LEGENDA: a/c = relação água/cimento; ARC = Agregado Reciclado de Concreto; AGR = Agregado Reciclado Graúdo;

NOTA: (*) Valor estimado através de gráfico apresentado no artigo.

Fonte: O autor (2022)

O aumento da absorção de água de CAA com ARC é resultado da alta capacidade de absorção de água do próprio agregado, devido à camada de argamassa residual aderida. Nota-se que esse efeito é mais evidente quando taxas mais altas de ARC são empregadas nas misturas de CAA (SILVA *et. al.*, 2016). Fiol *et. al.* (2018) também observaram que a influência do ARC no coeficiente de absorção de água dos CAA depende da relação a/c, pois na medida em que a relação a/c da mistura aumentou, a influência do ARC no coeficiente de absorção de água foi maior.

2.1.4 Técnicas de produção de concretos com ARC

Conforme discutido previamente, a incorporação de ARC na dosagem de concretos pode causar vários prejuízos às propriedades no estado fresco e endurecido. Um dos principais efeitos adversos da incorporação de ARC no concreto é a formação de uma microestrutura mais porosa e menos resistente, pois a ZT é responsável por governar o desenvolvimento de resistência mecânica e as propriedades de durabilidade do concreto.

Sabendo disso, é esperado que as propriedades mecânicas de concretos com ARC possam ser melhoradas modificando as características de superfície e a estrutura de poros dos ARC (POON; SHUI; LAM, 2004).

Nesse sentido, muitas alternativas têm sido propostas na literatura para minimizar os efeitos negativos dos ARC nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, sobretudo a fim de melhorar a microestrutura e evitar prejuízos à resistência mecânica e à durabilidade. Dentre elas, ajustes de dosagem, novas abordagens de mistura do concreto e tratamentos dos ARC. Algumas dessas técnicas são apresentadas a seguir.

2.1.4.1 Ajuste do consumo de água

Em decorrência da elevada capacidade de absorção de água do ARC, parte da água introduzida na mistura de concreto é absorvida pelo agregado, então a fração efetivamente disponível para promover fluidez e hidratação é menor do que o total, ou seja, a relação a/c efetiva é alterada (ETXEBERRIA *et. al.*, 2007). Portanto, é comum que o consumo de água das dosagens precise ser ajustado a fim de controlar o efeito de absorção dos ARC e evitar prejuízos à trabalhabilidade da mistura.

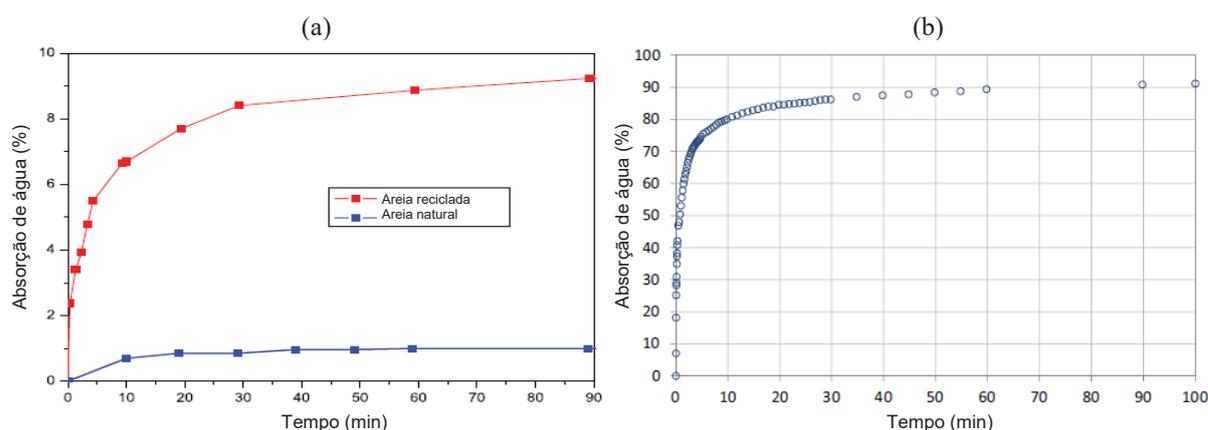
O ajuste pode ser feito somente aumentando a relação a/c de dosagem, conforme seguido por Grdic *et. al.* (2010). Para a dosagem de três misturas de CAA, com 100% de AN, 50% de AGR e 100% de AGR, respectivamente, foi feito um pequeno ajuste na quantidade de água a fim atingir a mesma consistência, variando a relação a/c em 0,41, 0,43 e 0,45. Porém, essa alternativa pode impactar negativamente na resistência mecânica do concreto. Por isso, alguns pesquisadores preferem a alternativa de ajustar a dosagem de aditivo superplastificante (FIOL *et.al.*, 2018; SINGH; MITHULRAJ; aARYA, 2019; MARTÍNEZ-GARCÍA *et.al.*, 2020).

Outra opção comumente adotada é a de ajustar o consumo de água em função da taxa de absorção do ARC e do percentual de substituição. Para tanto, os ARC são inseridos na mistura em estado seco e é introduzida uma quantidade adicional de água, correspondente à parcela absorvida pelo ARC. Admite-se que essa parcela não está disponível para promover hidratação e fluidez, ou seja, a relação a/c efetiva é mantida igual (GONZÁLEZ-TABOADA *et. al.*, 2017b). Como resultado, a resistência mecânica não deve ser afetada.

A taxa de absorção dos ARC, usada para calcular a parcela de água adicional, pode ser medida no intervalo de 24 horas, conforme KEBÄILI *et.al.* (2015). No entanto, conforme apresentado na Figura 9, resultados de outros estudos mostram que nos primeiros 10 minutos

o AGR absorve aproximadamente 80% de fração total absorvida em 24 horas (CARRO-LÓPEZ *et al.*, 2015; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017a). Esse comportamento é similar ao apresentado por outros tipos de agregados, como os agregados leves, também bastante porosos (KLEIN *et al.*, 2014). Então, alguns pesquisadores têm adotado esse critério para calcular o consumo de água que deve ser ajustado.

Figura 9 – Evolução da absorção de água de agregados em função do tempo



FONTE: (a) Adaptado de Carro-López *et al.*, 2015; (b) Adaptado de González-Taboada *et al.*, 2017a.

Em um estudo recente, Bahrami *et al.* (2020) investigaram a microestrutura de quatro composições de CAA com 25% de AMR e quatro composições com 25% de AGR, variando o teor de sílica ativa em 0%, 5%, 7,5% e 10%. Nas imagens de MEV das composições com 25% de AMR e 25% de AGR, sem sílica ativa, foram detectados vários poros. As imagens das duas composições com 5% de sílica ativa, 25% de AMR e 25% de AGR, mostraram uma microestrutura mais compactada, com uma notável redução do número de poros. Segundo os autores, a inclusão de sílica ativa contribui para a densificação da matriz, devido ao efeito de refinamento dos poros e produção adicional de gel C-S-H, como resultado da reação entre a sílica amorfa e hidróxido de cálcio. Para as outras composições, quando o teor de adição foi majorado para 7,5% e 10%, as imagens demonstram uma microestrutura mais homogênea, com grau ainda maior de refinamento dos poros.

A exemplo, Poon, Shui e Lam (2004) sugeriram o uso de concretos de alta resistência para produção de ARC, pois verificaram que o concreto preparado com ARC derivados de concreto de alto desempenho desenvolveu maior resistência à compressão e apresentou ZT mais densa do que o concreto preparado com agregados reciclados de concreto de resistência convencional.

2.1.4.2 Pré-saturação do ARC e condição de SSS

O método de pré-saturação do ARC também tem sido sugerido na literatura para compensar o efeito de elevada absorção de água do ARC. O objetivo desse método é reduzir ao máximo a troca de água entre o ARC e a pasta de cimento (FERREIRA; BRITO; BARRA, 2011). Seguindo esse princípio, algumas técnicas variadas têm sido adotadas pelos pesquisadores.

Ferreira, Brito e Barra (2011) testaram um método de pré-saturação do AGR para produzir composições de CCV com 0%, 20%, 50% e 100% de AGR, e compararam com a técnica de compensação de água. Nesse método o agregado reciclado, a água de amassamento do concreto e a água adicional de absorção do AGR foram misturados dentro do próprio misturador por 5 minutos antes da adição dos materiais restantes. Esse intervalo de tempo foi escolhido baseado nos resultados experimentais do ensaio de absorção do agregado. Comparando os resultados, os autores concluíram que as misturas de concreto produzidas pelo método de pré-saturação do ARC exibiram desempenho um pouco inferior as misturas produzidas pela técnica de compensação de água, principalmente no estado endurecido. Também observaram que, antes da mistura com a água, o AGR pré-saturado apresentava não somente um grau elevado de umidade, mas também era possível notar água na superfície e dentro dos poros. Segundo eles, essa condição pode ter prejudicado a penetração da pasta de cimento nos poros, causando redução do efeito de intertravamento e, conseqüentemente, a formação de uma ZT mais fraca entre a nova pasta de cimento e o ARC.

A fim de evitar essa adversidade, uma técnica comumente adotada pelos pesquisadores é incorporar o ARC na mistura em condição de saturação e superfície seca (SSS). Antes do procedimento de mistura do concreto os ARC são imersos em água durante um período específico de tempo até atingir a condição de saturação; depois de completar o período de saturação, é realizada uma secagem da superfície dos agregados para remover a umidade superficial das partículas.

Conforme mencionado anteriormente, no período inicial de contato com a água os ARC absorvem aproximadamente 80% da parcela total que pode ser absorvida após 24 horas de imersão. Logo, ao invés de manter o ARC imerso durante 24 horas para atingir a condição de SSS, conforme realizado por Singh, RB e Singh, B (2018), alguns pesquisadores adotam o período de 30 minutos de imersão em água (GESOGLU *et. al.*, 2015; GÜNEYISI *et. al.*, 2016).

Entretanto, em alguns estudos que fizeram emprego de ARC em condição de SSS, foram observadas alterações negativas das propriedades do CAA no estado fresco (GÜNEYISI *et. al.*, 2016) e redução da resistência mecânica no estado endurecido (GESOGLU *et. al.*, 2015).

Nesse sentido, Poon *et. al.* (2004) defendem que o uso de ARC na condição de SSS ou até mesmo na condição de umidade natural deve ser evitado na prática. Caso contrário, a água contida dentro das partículas de ARC pode se mover em direção à matriz de cimento criando uma relação a/c relativamente alta na proximidade das partículas, o que provavelmente resultará na formação de uma ZT mais fraca e na redução da resistência mecânica (POON *et. al.*; 2004; ETXEBERRIA *et al.*, 2007).

Poon *et. al.* (2004) acrescentam que, quando o ARC está completamente seco, a água dos vazios da matriz de cimento pode ser mover em direção às partículas do agregado reciclado, provocando um acúmulo de grãos de cimento ao redor dessas partículas. Como resultado, uma interface mais resistente pode ser formada entre a matriz de cimento e as partículas de agregado, principalmente em idades prematuras.

2.1.4.3 Abordagem de mistura em dois estágios

Com a finalidade de melhorar as propriedades de concretos produzidos com ARC, Tam, Gao e Tam (2005) propuseram um método especial de mistura, denominado abordagem de mistura em dois estágios (do inglês *Two Stage Mixing Approache – TSMA*). O processo de mistura é dividido em dois estágios e, proporcionalmente, o volume/massa total de água requerido conforme a dosagem é adicionado em diferentes momentos.

Conforme ilustrado na Figura 10, o processo de mistura de acordo com o método de *TSMA* segue as seguintes etapas: inicialmente, os agregados graúdos e miúdos são misturados por 60s; em seguida, metade da quantidade de água requerida é adicionada e mistura-se por mais 60s; então o cimento total é adicionado e mistura-se por mais 30s; por fim a metade restante de água é adicionada e mistura-se por mais 120s.

Figura 10 – Abordagem de mistura em dois estágios (*TSMA*)

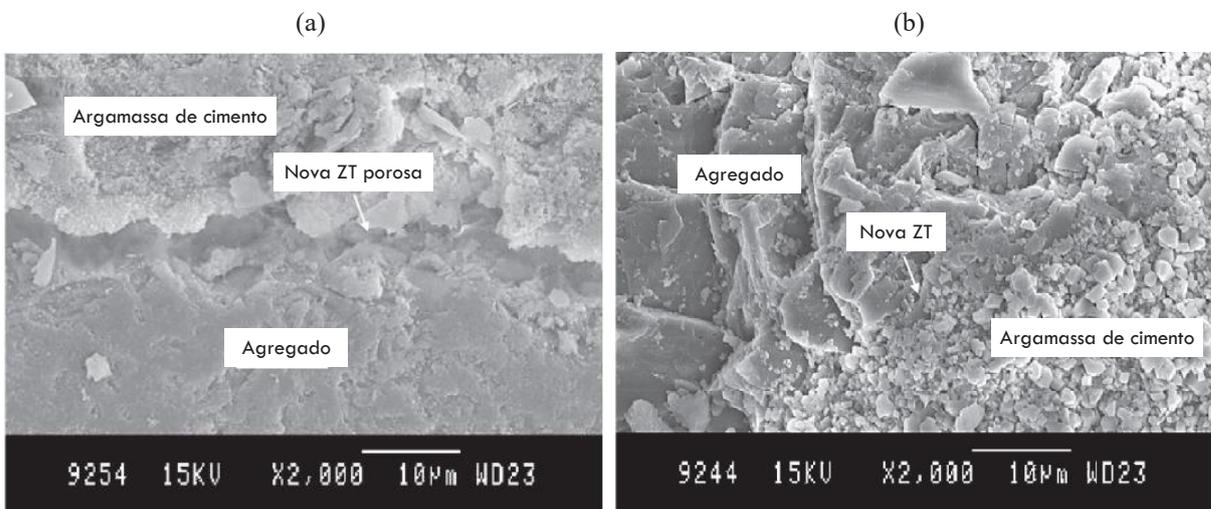


Fonte: Adaptado de Tam, Gao e Tam (2005)

Tam, Gao e Tam (2005) conduziram um estudo experimental de CCV comparando o método *TSMA* com uma abordagem convencional de mistura (do inglês *Normal Mixing Approach* – *NMA*). Foram adotadas taxas de substituição de AGR de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os resultados obtidos demonstram que o método *TSMA* pode melhorar a resistência à compressão do concreto, pois desenvolve uma ZT mais forte. Adotando esse método eles observaram aumento gradual da resistência à compressão na medida em que a taxa de AGR aumentou. A exemplo, na produção de CCV com taxas de 20% e 30% de AGR houve um aumento de, respectivamente, 21,19% e 13,94% na resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Por meio de imagens de MEV identificou-se que, adotando o *TSMA* como método de mistura, o concreto com ARC desenvolveu uma ZT mais forte e mais densa em comparação à ZT mais porosa do concreto misturado por método convencional (TAM; GAO; TAM, 2005). Na Figura 11 são apresentadas as imagens de MEV do estudo de Tam, Gao e Tam (2005).

Figura 11 – Imagens de MEV de amostras de concreto com AGR. (a) ZT porosa do concreto misturado por método convencional; (b) ZT mais densa e mais forte do concreto misturado pelo método *TSMA*.



Fonte: Adaptado de Tam, Gao e Tam (2005).

De acordo com Tam, Gao e Tam (2005), o método *TSMA* promove melhores resultados de desempenho do concreto porque durante o primeiro estágio da mistura, metade da água requerida é consumida, levando à formação de uma fina camada de pasta de cimento na superfície do ARC, que penetra na argamassa de cimento residual e preenche ou reduz os poros e fissuras; no segundo estágio de mistura, a água restante é adicionada para completar o processo de mistura.

2.1.4.4 Abordagem de mistura em dois estágios com adições minerais

Tam, V.W.Y e Tam, C.M. (2008) propuseram duas novas abordagens diversificadas do *TSMA* adicionando sílica ativa à mistura e conduziram um estudo experimental similar ao anterior (TAM; GAO; TAM, 2005). Pelo primeiro método, conhecido como *TSMA_s*, (do inglês *Two-stage Mixing Approache – sílica fume*), 2% de sílica ativa é adicionada em substituição parcial ao cimento. No segundo método, denominado *TSMA_{sc}* (do inglês *Two-stage Mixing Approache – sílica fume and cement*), a sílica ativa é adicionada em acréscimo ao cimento.

Comparado ao método convencional de mistura *NMA*, o concreto com 25% de AGR misturado pelo método *TSMA_{sc}* apresentou aumento de 19,73% na resistência à compressão e 20,49% na resistência à tração aos 28 dias de idade. Segundo os pesquisadores, em comparação à *NMA*, os métodos *TSMA_s* e *TSMA_{sc}* melhoram a ligação na interface agregado-matriz e contribuem para a formação de uma ZT menos porosa e com melhor intertravamento, o que justifica o aumento da resistência mecânica.

Tam, V.W.Y e Tam, C.M. (2008) também reforçam que, durante o estágio de pré-mistura pelos processos *TSMA_s* e *TSMA_{sc}*, a sílica ativa atua como um filler reforçando o espaço dentro do ARC, o que resulta na redução de tamanho individual dos poros e vazios da camada de argamassa antiga. Melhoras consideráveis foram notadas na microestrutura dos concretos misturados pelas duas abordagens propostas.

Mais recentemente, Rajhans, Panda e Nayak (2018) desenvolveram uma nova adaptação do método *TSMA*, proposto por Tam, Gao e Tam (2005), para misturas de CAA contendo misturas ternárias de finos (cimento, sílica ativa e cinza volante). Segundo essa abordagem, denominada *TSMA_{sfc}* (do inglês *Two-stage Mixing Approache – sílica fume, fly ash and cement*), na primeira fase de mistura são adicionados 7% da sílica ativa e a massa equivalente de cimento, proporcionalmente à taxa de ARC; depois, os agregados finos, a

cinza volante, o aditivo superplastificante e o cimento e água restantes são adicionados durante o segundo estágio de mistura.

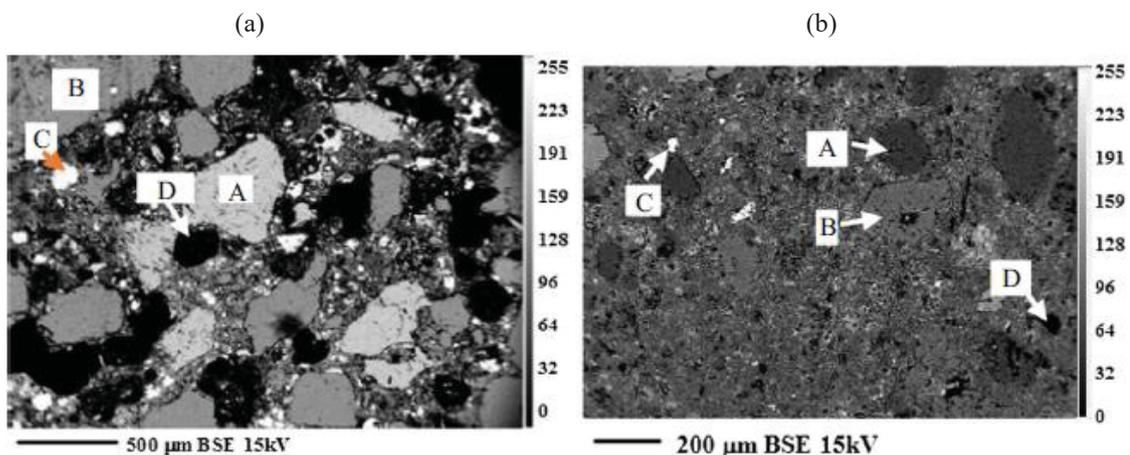
Rajhans, Panda e Nayak (2018) compararam o método $TSMA_{sfc}$ e o método $TSMA$ (TAM; GAO; TAM, 2005) com uma abordagem convencional de mistura (NMA) na produção de CAA com 0%, 20%, 40%, 60% e 100% de AGR. Similar aos resultados obtidos nos estudos prévios, os pesquisadores também observaram melhoras significantes nas propriedades do estado fresco e nas propriedades mecânicas adotando os dois procedimentos.

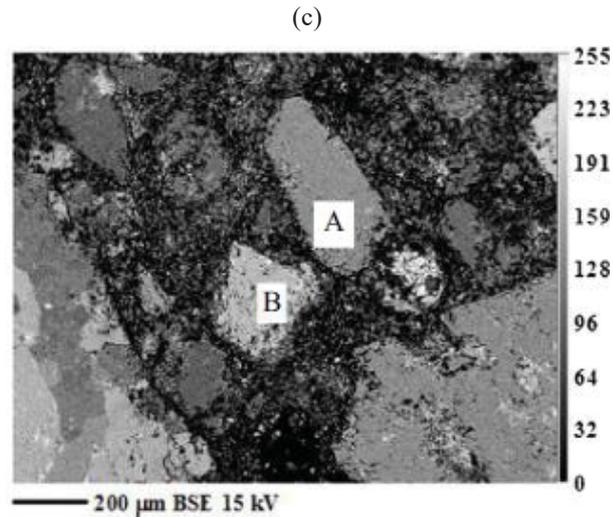
Comparando o método $TSMA$ com a abordagem de mistura convencional NMA , em uma das composições de CAA, com 100% de substituição de AGR, houve aumento de 12,95%, 16%, 15% e 0,45% nas propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Fazendo a mesma comparação, o método $TSMA_{sfc}$ proporcionou aumento ainda maior: 17,6% para a resistência à compressão, 30% para a resistência à flexão, 35% para a resistência à tração e 4,1% para o módulo de elasticidade.

Realizando uma análise microestrutural das amostras estudadas identificou-se que, devido ao método $TSMA$ houve mudança microestrutural e melhora significativa da ZT do CAA. Imagens obtidas usando micro-analisador de sonda eletrônica revelaram que nas amostras de CAA misturadas pelo método NMA há muitos poros e grãos de cimento não hidratados; enquanto nas amostras misturadas pelos métodos $TSMA$ e $TSMA_{sfc}$, esses elementos são menores e há maior formação de gel de C-S-H e hidróxido de cálcio (CH).

As imagens do estudo de Rajhans, Panda e Nayak (2018) são apresentadas na Figura 12. Os poros são representados pela letra “D”, os grãos de cimento anidros pela letra “C” e os componentes hidratados de C-S-H e CH, pela letra “A” e “B”, respectivamente.

Figura 12 – Imagens de amostras de CAA com ARC. (a) CAA produzido por NMA ; (b) CAA produzido por $TSMA$; (c) CAA misturado por $TSMA_{sfc}$.





Fonte: Rajhans, Panda e Nayak (2018)

2.1.4.5 Tratamento prévio dos ARC

Além da alternativa de ajuste do consumo de água, pré-saturação do ARC e abordagens de mistura diferenciadas, técnicas que envolvem tratamento prévio dos ARC também têm sido adotadas buscando melhorar as propriedades do concreto. Exemplos de estudos que adotaram técnicas alternativas são comentados a seguir.

Güneyisi *et. al.* (2014) testaram o método *TSMA* (TAM; GAO; TAM, 2005) e outras três alternativas de tratamento dos ARC para produção de misturas de CAA contendo 100% de AGR: pré-imersão em solução de ácido clorídrico (HCl), submersão prévia em solução de silicato de sódio (vidro líquido) e submersão prévia em pasta de cimento e sílica ativa. Através de imagens de MEV, os pesquisadores constataram que os tratamentos com solução de HCl, solução de silicato de sódio e o método *TSMA* proporcionaram uma microestrutura menos porosa e mais densa, em comparação com o CAA produzido com ARC não tratado. Já o tratamento com pasta de cimento e sílica ativa produziu uma microestrutura mais porosa e uma ligação mais fraca na ZT.

Especialmente, é comentado que o método *TSMA* contribuiu para a penetração da pasta de cimento do CAA dentro do ARC, o que permitiu o preenchimento de vazios e fissuras e proporcionou uma melhora significativa da ZT. Inclusive, comparando às outras três alternativas de tratamento do AGR testados, o CAA produzido a partir desse método obteve os melhores resultados de resistência à compressão nas idades de 28 e 90 dias, variando entre 60-67 MPa. O mesmo ocorreu para a resistência à tração, cujo resultados foram de 3,2 MPa e 3,7 MPa, respectivamente. Comparado ao CAA de referência (ARC não

tratado), na idade de 28 dias esses resultados representam um aumento de 13% na resistência à compressão e 10% na resistência à tração.

Em outro estudo experimental, Gupta *et. al.* (2020) testaram um método de tratamento prévio do ARC com imersão em solução de silicato de sódio e revestimento com sílica ativa. Três CAA contendo 100% de AGR não tratado, produzidos pelos métodos *NMA*, *TSMA* e *TSMA_{sfc}*, respectivamente, foram comparados a outros três CAA contendo 100% de AGR tratado. Os resultados revelaram que, empregando o AGR tratado, a resistência à compressão aumentou 12% para o CAA misturado pelo método *NMA*, 25% pelo método *TSMA* e 28% pelo método *TSMA_{sfc}*. Similarmente, houve aumento de, respectivamente, 32%, 28% e 29% para a resistência à tração. Quanto ao módulo de elasticidade, as taxas de aumento foram de, respectivamente, 5,5%, 9,8% e 8,0%.

Gupta *et. al.* (2020) também identificaram que, para todas as misturas, o método *TSMA* resultou em medidas maiores de *slump-flow* do que os demais métodos (*NMA* e *TSMA_{sfc}*). Rajhans, Panda e Nayak (2018) encontrou o mesmo padrão de resultados comparando os três métodos de mistura.

2.1.5 Recomendações de uso dos agregados de RCD segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021a)

Em razão dos efeitos adversos que podem ser causados pelo uso de ARC na produção de concretos e compósitos de cimento Portland, a versão atual da NBR 15116 (ABNT, 2021a) estabelece a seguinte recomendação:

Quando o agregado reciclado for utilizado em compósitos ou produtos com função estrutural, como concretos de cimento Portland, artefatos pré-fabricados e argamassas com função estrutural, é indicado unicamente utilizar a subclasse ARCO⁴. A substituição de agregado natural por agregado reciclado, nesses casos, deve ser limitada a 20% da massa de agregados totais e a concretos das classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118: 2014.

Além disso, para uso dos agregados reciclados na produção de argamassas e concretos, a norma também prevê que seja seguida a técnica de pré-saturação dos agregados reciclados ou o método de compensação da água absorvida pelo agregado com o intuito de

⁴ ARCO: Agregado reciclado constituído predominantemente por resíduos de concreto

promover o ajuste das propriedades reológicas, como trabalhabilidade, consistência, perda de abatimento, entre outras.

Ressalta-se que, quando adotado o método de compensação de água, no cálculo da relação água/cimento efetiva deve ser descontada a quantidade de água absorvida pelos agregados reciclados, a partir das Equações 1 e 2 a seguir.

$$C_{ae} = C_{at} - (C_{ag} \times A \times K1) - (C_{am} \times A \times K1) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$a/C_e = C_{ae} / C_c \quad (\text{Eq. 2})$$

C_{ae} é a quantidade de água efetiva, dosada por metro cúbico de concreto, descontada a absorção de água do agregado reciclado, expressa em quilogramas (kg);

C_{at} é a quantidade de água total, por m^3 de de concreto, expressa em quilogramas (kg);

C_{ag} é a quantidade de agregado graúdo reciclado, dosado por m^3 de de concreto, expressa em quilogramas (kg);

C_{am} é a quantidade de agregado miúdo reciclado, dosado por m^3 de de concreto, expressa em quilogramas (kg);

A é a absorção de água do agregado reciclado, expressa em porcentagem de massa (%);

$K1$ é a fração percentual de água absorvida nas primeiras horas pelo agregado reciclado, expressa em relação à sua absorção de água em 24 h;

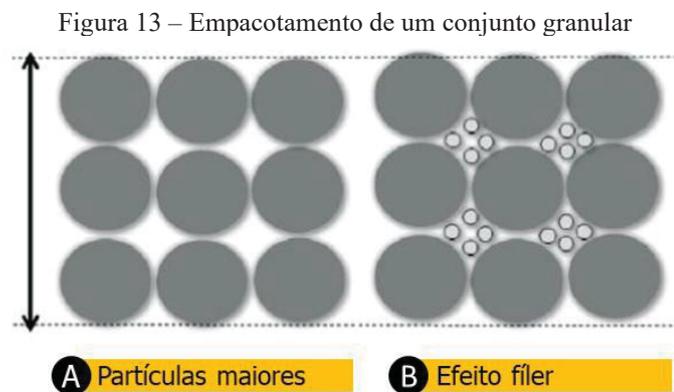
C_c é o consumo de cimento por metro cúbico de concreto ou argamassa, expresso em quilogramas (kg);

a/C_e = relação água/cimento efetiva

A norma também inclui uma nota sugerindo que podem ser adotados valores de $K1$ próximos a 80% da absorção de água por 24 horas do agregado reciclado, reconhecendo que a prática tem mostrado que é um valor adequado. Conforme mencionado anteriormente, é uma prática que já tem sido adotada por pesquisadores da área (FERREIRA; BRITO; BARRA, 2011; CARRO-LÓPEZ *et al.*, 2015; GONZÁLEZ-TABOADA *et. al.*, 2017a).

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O estudo de empacotamento de partículas pode ser definido como a seleção adequada de proporção e tamanho de partículas de modo que os vazios entre as partículas maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujo vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (OLIVEIRA, 2000). Este efeito de preenchimento, conhecido como efeito fíler resulta na diminuição da porosidade de um conjunto granular, aumentando a sua densidade de empacotamento (LONDERO *et. al.*, 2017). A Figura 13 ilustra o empacotamento de um conjunto granular através do efeito fíler.



Fonte: Hermann *et. al.* (2016)

O empacotamento de partículas descreve a fração de partículas sólidas que ocupa determinada unidade de volume e, costuma ser medido pela densidade de empacotamento (α), que é definida como a relação entre o volume de partículas sólidas (V_s) e o volume total unitário (V_t), conforme Equação 3 (FENNIS, 2011).

$$\alpha = \frac{\text{Volume sólido}}{\text{Volume total}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em 1892, Féret publicou o primeiro tratado sobre a aplicação do conceito de empacotamento de partículas em concreto, onde relatou que a seleção de tipos adequados de agregados tem uma relação íntima com a porosidade do material no estado endurecido e com a resistência à compressão quando submetido ao processo de cura úmida (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Segundo Fennis e Walraven (2012), desde o século XIX, com a publicação de Féret, o conceito de empacotamento de partículas é assunto de interesse na história do concreto. Desde então, diversos modelos de empacotamento de partículas têm sido propostos para calcular a densidade de empacotamento das partículas e otimizar misturas granulares de concreto a fim de obter máxima densidade de empacotamento (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Mas, principalmente nas últimas décadas, a otimização de distribuição de partículas ganhou novo interesse com a introdução de novos tipos de concreto, como concreto de alto desempenho, concreto autoadensável, concreto reforçado com fibras e concreto ecológico (FENNIS; WALRAVEN, 2012).

2.2.1 Evolução dos modelos de empacotamento de partículas

Os estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento de partículas resultaram de duas abordagens: uma discreta, que considera as partículas individualmente e outra contínua, que trata as partículas como distribuições contínuas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Os trabalhos que fundamentam essas duas abordagens são o de Fuller e Thompson (1907), que constituiu base para os modelos contínuos, e o de Furnas (1931) que constituiu base para os modelos discretos (FUNK; DINGER, 1994).

2.2.1.1 Otimização da distribuição granulométrica

Os primeiros pesquisadores da área estudaram a abordagem dos modelos contínuos, propondo curvas teóricas que descrevem uma distribuição granulométrica ideal para os agregados. Fuller e Thompson foram um dos pioneiros desses estudos (FENNIS, 2011). Em 1907 os pesquisadores propuseram uma distribuição contínua de partículas, descrita pela Equação 4, para um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,5 (LONDERO, *et. al.*, 2017).

$$CPFT (\%) = 100 \times \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde $CPFT (\%)$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (do inglês *cumulative percent finer than D*), D é diâmetro da partícula, D_{max} corresponde ao diâmetro da maior partícula do conjunto e q é o coeficiente de distribuição.

A equação prevê que, para cada intervalo de dimensão de partículas, deve haver um percentual exato de partículas menores que preencham os vazios entre as partículas maiores. O modelo ficou reconhecido como a curva de Füller e cálculos de dosagem baseados nessa curva são usados até os dias atuais (FENNIS, 2011).

Mais tarde, Andreasen e Andersen (1930) concluíram, a partir de resultados experimentais, que para obter a máxima densidade de empacotamento o módulo de distribuição (q) da equação deveria variar entre 0,33 – 0,50. Eles também defenderam que esse fator deve ser determinado empiricamente e, portanto, pode diferir dependendo das características do agregado (OLIVEIRA *et. al.*, 2000).

No entanto, em ambos os modelos não há um limite mínimo de dimensão das partículas, ou seja, são admitidas partículas infinitamente pequenas, o que superestima a densidade de empacotamento. Então, em 1980, Funk e Dinger reconheceram que essa condição não condiz com um material granular real e adaptaram a curva de Füller introduzindo à equação um limite inferior de tamanho das partículas (FUNK; DINGER, 1994), conforme descrito pela Equação 5. Esse modelo ficou conhecido como modelo de Alfred.

$$CPFT (\%) = 100 \times \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \text{ (Eq. 5)}$$

Onde $CPFT (\%)$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (do inglês *cumulative percent finer than D*), D_{min} é o diâmetro da menor partícula, D é diâmetro da partícula, D_{max} corresponde ao o diâmetro da maior partícula do conjunto e q é o coeficiente de distribuição.

O trabalho de Funk e Dinger (1994) também contém resultados de simulações computacionais conduzidas pelos pesquisadores demonstrando que a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular é obtida quando o coeficiente (q) assume o valor de 0,37. O valor atribuído ao expoente (q) provê uma indicação da fração fina que pode ser acomodada na mistura; se o expoente cresce, significa que há um aumento de partículas mais grossas e se ele decresce, a quantidade de partículas finas aumenta (KUMAR; SANTHANAM, 2003). Para uma mistura apresentar boa capacidade de escoamento, o valor do coeficiente de distribuição deve ser menor que 0,30; assim, a consideração de (q) com valores próximos a 0,30 favorece a produção de concretos adensados sob vibração, enquanto valores menores que 0,25 resulta em misturas auto adensáveis (VANDERLEI, 2004).

A otimização de composições de concreto a partir de curvas granulométricas ideais predefinidas é um método popular até os dias atuais; é bastante usado na prática e aplicado em muitas normas de especificação (FENNIS; UIJL; WALRAVEN, 2009). Por exemplo, a norma brasileira de especificação de agregados para concreto – NBR 7211 (ABNT, 2009a) – que sugere que a distribuição granulométrica dos agregados deve atender aos limites de zona ótima ou zona utilizável estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

Tendo-se uma curva teórica, busca-se uma combinação entre as partículas dos materiais disponíveis de forma a se aproximar o máximo possível desta curva ideal. Para isso, recursos simples de otimização computacional podem ser utilizados (REBMANN, 2011). Por exemplo, o método dos mínimos quadrados empregado por Pereira (2010) e Yu, Spiesz e Brouwers (2015) com auxílio de planilhas eletrônicas.

Outro exemplo de aplicação dos modelos contínuos é o trabalho de Brouwers e Radix (2005). Eles desenvolveram um método de dosagem a partir da qual composições sólidas de misturas de CAA são formuladas buscando maior compatibilidade possível com a curva de distribuição granulométrica proposta por A&A. Depois, Wang *et. al.* (2014) propuseram modificações do método, adaptando o intervalo admitido para o módulo de distribuição q . Usando o novo algoritmo desenvolvido a partir do modelo modificado de Brouwers e Radix, Wang *et. al.* (2014) obtiveram dosagens de CAA com consumo de aglomerante reduzido em até 20%, mantendo desempenho de qualidade.

Mwasha e Ramnath (2018) adotaram a curva de Fuller e Thompson como referência para otimizar a distribuição granulométrica de três tipos distintos de agregados para obter combinações ótimas, ou seja, com melhor empacotamento. Para tanto, cada tipo de agregado foi peneirado separadamente, e então, as frações contidas em cada intervalo de peneiras, foram combinadas em proporções variadas, incluindo frações grossas e finas (19 mm - 0,075 mm). As combinações foram criadas pelo método de tentativa e erro, até obter maior compatibilidade com a curva de F&T.

No entanto, algumas características das partículas, como a morfologia e a densidade não são levadas em consideração pelas curvas propostas pelos modelos contínuos. Assim, ainda que na literatura seja proposto valor de $q = 0,37$ para se obter a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular, este valor pode variar conforme as características das partículas utilizadas nas misturas.

2.2.1.2 Modelos discretos de empacotamento de partículas

Os modelos discretos prescrevem como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente a partir da divisão das partículas em classes de diferentes tamanhos. Por consequência, admite-se que entre uma classe e outra, há ausência de grãos de determinados tamanhos, o que caracteriza uma distribuição granulométrica descontínua.

A partir de características das partículas contidas em cada classe, são usadas equações matemáticas que permitem calcular a densidade de empacotamento teórica de misturas granulares com base na distribuição granulométrica (FENNIS, 2011).

Furnas (1929) introduziu essa abordagem com um modelo para calcular a densidade de empacotamento de misturas binárias (KUMAR; SANTHANAM, 2003). O modelo é válido para duas condições: quando a quantidade de partículas maiores é dominante na estrutura e as partículas pequenas preenchem seus vazios; ou quando a quantidade de partículas pequenas é dominante e as partículas maiores são acomodadas em uma matriz de partículas pequenas (FENNIS, 2011). Entretanto, o modelo era válido somente para misturas de dois grupos de partículas sem interação (FENNIS, 2011).

Aim e Goff (1968) também propuseram um modelo de empacotamento de misturas binárias de grãos esféricos. Porém, experimentalmente, os pesquisadores observaram que um excesso de porosidade na primeira camada de grãos esféricos em contato com uma parede plana e lisa. Então, o diferencial desse modelo é que um fator de correção é sugerido para considerar uma perturbação no volume total da mistura no cálculo da densidade de empacotamento. Esse efeito é resultado da interação entre os grãos e a parede do recipiente onde a mistura está contida e ficou conhecido como “efeito parede” (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

O conceito de empacotamento de misturas binárias foi estendido por Toufar (1976) para formar misturas ternárias combinando agregados grossos, médios e finos (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017). O avanço seguinte nos modelos discretos de empacotamento foi a extensão para modelos multicomponentes e a introdução de parâmetros que consideram efeitos de interação entre as partículas (FENNIS, 2011).

Stovall, De Larrard e Buil (1986) propuseram o *Linear Packing Model (LPM)* para calcular a densidade de empacotamento de sistemas multicomponentes. No *LPM*, a densidade de empacotamento é representada como uma função da fração sólida (em volume) de cada classe de partículas presente na mistura.

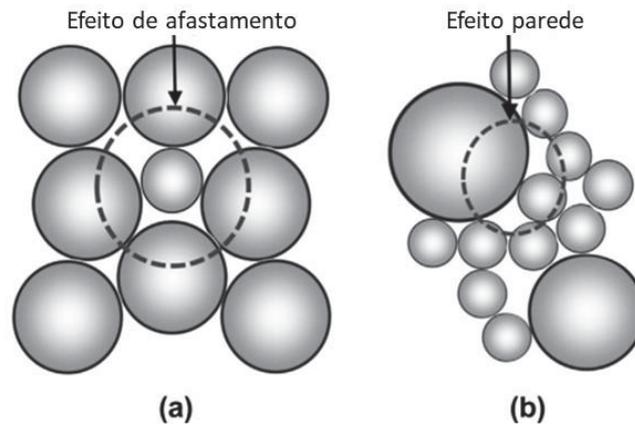
No final do século XX, De Larrard (1999) propôs o *Compressible Packing Model* (CPM) como uma versão aprimorada do *LPM*. O *CPM* permite prever a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por n classes de tamanhos de grãos (LONDERO *et. al.*, 2017). Três parâmetros são considerados no cálculo: (1) densidade de empacotamento de cada classe do conjunto granular, (2) distribuição granulométrica do conjunto; e (3) energia de compactação (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

O *CPM* é baseado no conceito da densidade de empacotamento virtual, definida como a máxima densidade de empacotamento que uma mistura de grãos pode obter quando as partículas, mantendo sua forma original, são organizadas uma por uma, atingindo máximo estado de compactação. Partindo desse conceito, a densidade de empacotamento real é deduzida em função da densidade de empacotamento virtual e um índice de compactação da mistura (DE LARRARD, 1999).

Outro avanço do modelo de De Larrard (1999) foi a implementação de equações para calcular os efeitos de interações sucessivas entre partículas de diferentes tamanhos, admitindo que há uma classe dominante de grãos e que esta classe assegura a continuidade sólida do corpo granular. Supondo duas classes de partículas: partículas grossas (Classe 1) e partículas finas (Classe 2). Conforme descrito abaixo e ilustrado na Figura 14 para a condição em que $d_1 \geq d_2$, ocorrem dois efeitos de interação que diminuem a compacidade da mistura:

- efeito de afastamento (*loosening effect*) ocorre quando a classe 2 de partículas finas é inserida nos poros de um sistema de partículas grossas (que são dominantes); porém as partículas finas não são suficientemente pequenas para preencher os vazios entre as partículas grossas sem causar um distúrbio no esqueleto granular grosso, prejudicando o efeito de preenchimento das partículas finas e reduzindo a densidade de empacotamento do sistema pelo afastamento das partículas maiores (DE LARRARD, 1999).
- efeito parede (*wall effect*) ocorre quando as partículas finas são dominantes e algumas partículas grossas isoladas são inseridas na matriz; então, a interação entre as partículas finas é interrompida pelos limites de superfície introduzido pelas partículas grossas, resultando na formação de vazios adicionais na região de interface de contato entre os grãos (DE LARRARD, 1999).

Figura 14 – Efeitos de interação entre as partículas. (a) Efeito de afastamento. (b) Efeito parede



Fonte: Wong, Chan e Kwan (2013); Mehdipour e Khayat (2018);

Atualmente o *CPM* é um dos modelos mais reconhecidos e mais usados pelos pesquisadores para calcular a densidade de empacotamento e dosar misturas de concreto (SEBAIBI *et. al.*, 2013; LONG *et. al.*, 2018; RADHIKA *et. al.*, 2017; KLEIN; LENZ; MAZER, 2020; CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2020).

Em trabalhos posteriores algumas inovações foram propostas para o *CPM*, dando origem à novos modelos de empacotamento. De Larrard e Sedran (2002) desenvolveram uma adaptação do *CPM* para aplicação em concretos de alto desempenho. Fennis (2011) e Fennis, Walraven e Uijl (2013) desenvolveram um método de dosagem cíclico para concretos ecológicos com baixo consumo de cimento (abaixo de 260 kg/m³) e propuseram um modelo de empacotamento baseado no *CPM*, denominado CIPM (Compaction-interaction packing model).

2.2.2 Otimização de misturas de CAA a partir de empacotamento de partículas

Na última década vários estudos têm sido desenvolvidos usando as teorias de empacotamento de partículas para formular dosagens otimizadas de CAA. A abordagem mais comum desses estudos envolve o aumento da densidade de empacotamento do esqueleto granular usando as medidas de massa unitária ou de massa específica em estado de compactação (MUELLER, WALLEVIK E KHAYAT, 2014).

Nesse sentido, a otimização da composição granulométrica dos agregados e das proporções entre partículas finas e grossas podem aumentar a densidade de empacotamento do concreto, reduzindo os vazios entre os agregados e, portanto, diminuindo o consumo de pasta requerido para preencher os vazios (LONG *et. al.*, 2017).

Tem-se, então, que, combinando agregados graúdos e miúdos em diferentes proporções, há uma combinação ótima que produz a máxima densidade de empacotamento. Essa combinação é expressa pela fração de agregados miúdos (*fine aggregates*) em relação ao total de agregados, denominada taxa F/A. Por esse motivo, nos estudos de dosagens de CAA por empacotamento de partículas a taxa F/A é o parâmetro mais adotado como índice de medida da densidade de empacotamento da fase de agregados da mistura.

Ao medir a densidade de empacotamento da composição de agregados miúdos e graúdos, Zuo *et. al.* (2018) identificaram que, o volume de vazios decresce quando a fração volumétrica de areia é de 0-40%. Exatamente com 40% de areia (F/A = 0,40) a composição de agregados atingiu o estado mais denso e depois, na medida em que essa fração foi aumentada até 100% o volume de vazios também cresceu gradualmente.

Long *et. al.* (2017) também calcularam a densidade de empacotamento de uma série de sistemas granulares compostos por agregados, variando a taxa F/A de 0 a 1, usando o modelo CPM (DE LARRARD, 1999). Notou-se que a densidade de empacotamento cresceu gradualmente de 0 a 0.45 e atingiu seu valor máximo quando F/A = 0.45. Depois, no intervalo de 0.45 a 1.00, a densidade de empacotamento dos agregados decresceu.

Segundo Long *et. al.* (2017), esse comportamento é justificado pelos efeitos de interação entre as partículas. Na fase inicial ocorre o efeito de afastamento, pois os agregados graúdos são dominantes. Com a adição de partículas finas no sistema (aumento da taxa F/A), os vazios entre os agregados graúdos são preenchidos e a densidade de empacotamento aumenta. Depois, há um decréscimo da densidade de empacotamento, pois na medida em que a taxa F/A aumenta, o sistema de agregados é dominado por partículas finas e causa o efeito parede.

Ashish e Verma (2019) também avaliaram a densidade de empacotamento em função da taxa F/A. Para uma composição de agregado graúdo e areia natural de rio, as maiores medidas de densidade de empacotamento foram obtidas para F/A = 0,50 e 0,55. Ao adicionar à composição uma areia de resíduos de fundição, a máxima densidade de empacotamento foi obtida para a taxa F/A = 0,55.

O que justifica o estudo da composição granulométrica e do empacotamento de agregados em conjuntos granulares de concreto é a otimização do volume de pasta da mistura.

Na década de 1960, Powers sugeriu que, em macro escala, o preenchimento sucessivo de vazios com partículas de menor tamanho pode aumentar a densidade de empacotamento dos agregados. Dentro desse conjunto granular, um volume mínimo de pasta é requerido para preencher os vazios remanescentes e um volume adicional, conhecido como excesso de pasta, é requerido para lubrificar os agregados a fim de prover fluidez à mistura (LI; KWAN, 2013).

Daí, tem-se a importância de maximizar a densidade de empacotamento do conjunto granular da mistura. Como o excesso de pasta é o que provê trabalhabilidade, a otimização do volume de pasta a partir da teoria de Powers se dá em dois sentidos: (1) para dado volume de pasta, uma combinação de agregados com alta densidade de empacotamento irá promover mais fluidez à mistura (2) para dado índice de trabalhabilidade requerido, maximizar o empacotamento dos agregados permite que o volume de pasta seja reduzido (LI; KWAN, 2013). Esse princípio tem sido aplicado para otimização de composições de concretos predominantemente a fim de reduzir o consumo de cimento das misturas.

Os resultados obtidos por Nanthagopalan e Santhanam (2011) em um estudo experimental exemplificam a primeira condição de otimização da pasta. Os autores testaram uma série de combinações de agregado envolvendo duas frações de agregado graúdo e areia artificial. Para a combinação com a máxima densidade de empacotamento, sete composições de CAA foram produzidas variando o volume de pasta de 360 a 490 litros e, quanto maior o volume de pasta, maior foi a medida de slump-flow obtida. Em acréscimo, observou-se que, para essa proporção de agregados, o volume de pasta requerido para atingir o *slump-flow* mínimo de 550 mm é de aproximadamente 370–390 litros.

Diante desse resultado, tem-se que, para dada densidade de empacotamento, há um volume ótimo de pasta cujo o excesso de pasta resultante satisfaz o grau mínimo de fluidez requerido. Então, ao invés de aumentar o volume de pasta e obter alto desempenho de fluidez, uma alternativa mais otimizada é definir um volume ótimo de pasta em função da densidade de empacotamento dos agregados e do grau de fluidez desejado.

Partindo desse mesmo princípio, Kanadasan e Razak (2015) formularam composições de CAA incorporando resíduos de óleo de palma empregando um fator de correção de lubrificação (FCL) para otimização do volume de pasta. Diversas proporções combinando agregados naturais com os resíduos de óleo de palma foram selecionadas. Em função da densidade de empacotamento de cada combinação, o FCL é aplicado a fim de obter o maior volume de pasta disponível para determinado volume de concreto e prover fluidez à mistura.

2.2.2.1 Ecoeficiência dos concretos

Um dos principais objetivos dos estudos que envolvem uso de empacotamento de partículas para dosagem de CAA é a otimização do volume de pasta visando reduzir o consumo de cimento a fim de mitigar o impacto ambiental causado pela produção de clínquer. Nesse contexto se insere à segunda abordagem de otimização referida por Li e Kwan (2013). Na medida em que o volume de pasta é reduzido, o consumo de aglomerantes também é, sobretudo o consumo de cimento, o que resulta não somente em ganhos ambientais, mas também econômicos e técnicos.

Um indicador bastante comum adotado pelos pesquisadores para medir a eficiência ecológica de concretos dosados com consumo otimizado de cimento é *Binder Index* (BI), proposto por Damineli *et. al* (2010). Por definição, o BI é calculado a partir da quantidade de cimento (em kg/m^3 de concreto) consumida para obter uma unidade de resistência (1 MPa). Quanto menor o BI, maior é a ecoeficiência do concreto. O BI também pode ser calculado em relação ao consumo de aglomerantes, incluindo o cimento e demais adições. Nesse estudo, Damineli *et. al* (2010) também constataram que o fator BI tende a ser menor para concretos de resistência mais elevada, indicando melhor ecoeficiência.

Em dosagens de CAA com agregados convencionais, pesquisadores têm obtido valores de BI em torno de 5 a 6 kg/m^3 .MPa para resistências mais elevadas. Já para resistência mais baixas, esse valor é um pouco maior. Long *et. al.* (2017) alcançaram BI de 13 kg/m^3 .MPa para um CAA com RC de 25 MPa aos 28 dias de idade. Zhao *et al.* (2015) encontraram um BI de 8 kg/m^3 .MPa para um CAA de resistência mais alta (56 MPa).

Em um estudo feito por Pelisser, Vieira e Bernardin (2018), composições de CAA de baixa e alta resistência à compressão com consumo de cimento reduzido foram produzidas a partir do empacotamento dos agregados. Os resultados demonstraram que, para uma CAA com 240 kg/m^3 de cimento, 26,7 kg/m^3 de cinza volante e 26,7 kg/m^3 de metacaulim se obteve um CAA com 28,6 MPa de resistência à compressão aos 28 dias e BI de 10,2 kg/m^3 .MPa. Em outra composição, com 472 kg/m^3 de cimento e 52,0 kg/m^3 de metacaulim, o CAA atingiu 67,2 MPa na mesma idade, resultando fator BI de 7 kg/m^3 .MPa.

Matos, Foiato e Prudêncio Jr. (2019) atestaram que o uso de cinza volante pode ser bastante contributivo na ecoeficiência de CAAs. Os pesquisadores ensaiaram misturas de CAA contendo 10%, 20% e 30% de CV em substituição ao CP e o fator BI para a resistência à compressão aos 28 dias variou de 6,2 a 6,6, kg/m^3 .Mpa, comparado a 7,2 obtido para o

CAA dosado sem CV. Já na idade de 91 dias, o BI variou de 5,1 a 5,4 kg/m³ .MPa para os CAAs com CV, enquanto o CAA de referência apresentou BI de 6,8 kg/m³ .MPa.

Matos, Foiato e Prudêncio Jr. (2019), também obtiveram um baixo fator BI (6 kg/m³ .MPa) para um CAA de elevada resistência (87 MPa na idade de 28 dias), dosado com 526 kg de cimento por m³ de concreto. Em outras misturas de concreto, produzidas consumo de cimento reduzido (211 – 316 kg/m³) e substituição por cinza volante nas taxas de 40%, 50% e 60%, o fator BI variou de 7,6 a 12,2 kg/m³ .MPa quanto a RC na idade de 28 dias.

Na literatura há poucos dados referentes ao fator BI de concretos produzidos com agregados reciclados. Thomas, Setién e Polanco (2016) desenvolveram um dos poucos trabalhos que exploram essa abordagem. Foram produzidas quatro misturas de CCV, um de referência com agregados naturais e outras três com substituição dos AN por ARC nas taxas de 20%, 50% e 100%. Os concretos com ARC atingiram resistência à compressão de 36,7, 37,7 e 38,4 MPa na idade de 28 dias para as taxas de 20%, 50% e 100%, respectivamente. Os respectivos valores de BI foram de 8,26, 8,29, e 8,32 kg/m³ .MPa.

2.2.2.2 Parâmetros de dosagem de CAA por empacotamento de partículas

Na tabela 7 são apresentados parâmetros de dosagem adotados em alguns estudos de CAA dosados por empacotamento de partículas. Para fins de comparação, também são apresentados alguns limites de dosagem de CAA sugeridos pelos documentos de especificação do EFNARC (2005) e do ACI (2007).

Tabela 7 – Parâmetros de composições de CAA dosadas por empacotamento de partículas (revisão da literatura)
(continua)

Referência	Método usado para medir a DE	F/A	DE	Volume de pasta (%)	Agl. (kg/m ³)	C (kg/m ³)	Slump-flow (mm)
EFNARC (2005)	-	0,48-0,55	-	30,0% - 38,0%	380-600	-	-
ACI 237 (2007)	-		-	34,0% - 40,0%	386-475		-
Nanthagopalan e Santhanam (2011)	Determinação experimental da massa unitária	0,55	0,700	36,7% - 48,8%	350-650	210-390	20-830
Kanadasan e Razak (2014)	Determinação experimental da massa unitária	0,50	0,579 - 0,710	41,4% - 52,1%	223-384	420	660-750

Tabela 7 – Parâmetros de composições de CAA dosadas por empacotamento de partículas (revisão da literatura)
(conclusão)

Long <i>et. al.</i> (2017)	CPM (De Larrard, 1999)	0,40 0,45 0,50	0,820	25,0% - 31,0% (*)	320-380	152-380	545- 620
Sebaibi <i>et. al.</i> (2013)	Fator de empacotamento (FE = 1,1)	0,50	0,872	29,0% (*)	397	357	600
Zuo <i>et. al.</i> (2018)	CPM - 3 parâmetros (Wong e Kwan, 2014)	0,45 0,50 0,55	N.I	29,8% - 36,1% (*)	361-520	308	490- 700
Wang <i>et. al.</i> (2014)	Otimização de curva de distribuição	0,45	N.I	34,0% - 39,0%	380 - 480	285 - 336	597- 762
Sun <i>et. al.</i> (2018)	CPM - 4 parâmetros (Roquier, 2018)	0,40 0,42 0,44	N.I	25,5% - 32,0%	375-510	280-480	420- 515
Ashish e Verma (2019)	Fator de empacotamento (FE = 1,056 – 0,160)	0,46 0,50 0,55	N.I	34,3% - 45,8 % (*)	472-912	354-684	760- 790

LEGENDA: F/A = taxa de agregados miúdos em relação ao total; DE = densidade de empacotamento da composição de agregados; Agl = consumo de aglomerantes; C = consumo de cimento; N.I. = dado não informado;

NOTA: (*) valor calculado a partir de dados apresentados no trabalho.

Fonte: O autor (2022)

Observando a tabela 8 é possível notar que, na maioria dos estudos referenciados, os menores consumos de aglomerante são relativamente mais baixos quando comparado aos limites recomendados pelo EFNARC (2005) e pelo ACI (2007). Pode-se observar que em todos os estudos, a taxa F/A das composições varia no intervalo de 0,40-0,55, também compatível com o limite recomendado pelo EFNARC (2005).

Analisando os quatro primeiros estudos listados na tabela, verifica-se que há uma relação entre a densidade de empacotamento, o volume de pasta e o espalhamento do concreto. Por exemplo, verificando os resultados de Nanthagopalan e Santhanam (2011) e Kanadasan e Razak (2014), observa-se que, para as composições cujo o conjunto granular dos agregados tem menor densidade de empacotamento, o volume de pasta do concreto é maior e, como resultado, foram obtidas medidas de *slump-flow* mais altas.

2.2.3 Métodos de dosagem de CAA baseado nos conceitos de empacotamento de partículas

Seguindo o princípio de otimização do volume de pasta visando reduzir o consumo de cimento nas composições de concreto, alguns métodos de dosagem de CAA baseados nos conceitos fundamentais e nos modelos de empacotamento de partículas têm sido propostos na literatura.

Um dos primeiros métodos de dosagem de CAA envolvendo conceitos de empacotamento de partículas foi proposto por Su, Hsu e Chai (2001), cujo principal consideração é que a pasta de aglomerantes deve preencher os vazios da estrutura formada pelos agregados dispostos aleatoriamente, ou seja, em estado solto.

Para calcular a quantidade de agregados da composição, admite-se que a relação volumétrica dos agregados finos para o total de agregados deve variar entre 50-57% e adota-se um parâmetro nomeado como fator de empacotamento, definido como a relação entre a massa de agregados em estado de compactação e a massa de agregados em estado solto.

Esse parâmetro continua sendo adotado em métodos de dosagem de CAA propostos mais recentemente, como por exemplo o método de Sebaibi *et. al.* (2013) e o método de Ashish e Verma (2019). Em ambos, o fator de empacotamento é usado para calcular as proporções dos agregados graúdos e miúdos, o consumo de cimento e a relação a/c são determinadas em função de um valor alvo para a resistência à compressão aos 28 dias.

Wang *et. al.* (2014) desenvolveram um método de dosagem de CAA que usa um algoritmo sequenciado para otimizar a combinação dos ingredientes sólidos usando a curva de distribuição de A&A como referência. As distribuições granulométricas dos ingredientes sólidos são usadas como dado de entrada e o algoritmo opera combinando diferentes proporções dos materiais a fim de minimizar o desvio entre a distribuição granulométrica real da combinação e a distribuição dada pela curva de A&A. Na fase experimental, três CAA foram dosados com módulo de distribuição q variando de 0,23 à 0,29.

2.2.4 Dosagem de CAA com ARC a partir de modelos de empacotamento de partículas

Não há normas ou guias de recomendação que especifiquem uma metodologia de dosagem para concretos com ARC. Então, a maioria dos pesquisadores adotam os métodos convencionais de dosagem para proporcionar misturas contendo ARC (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017). Entretanto, conforme discorrido neste capítulo, algumas

particularidades dos ARC, em especial a elevada absorção de água, podem acarretar efeitos adversos nas misturas de concreto, convencionais ou auto adensáveis.

Por esse motivo, diversas técnicas têm sido propostas na literatura para melhorar as propriedades do CAA dosado com ARC. Recentemente, sobretudo nos últimos cinco anos, alguns pesquisadores têm explorado o emprego de técnicas e conceitos de empacotamento de partículas para dosagem de concretos com incorporação de ARC.

Provavelmente, um dos estudos mais relevantes dentro dessa abordagem é o trabalho de Pradhan, Kumar e Barai (2017). Eles propuseram um método de dosagem para concretos com ARC, denominado *Particle Packing Model (PPM)*, fundamentado no método das misturas sucessivas, que consiste em combinar, experimentalmente, dois ou mais agregados em proporções variadas até obter o menor índice de vazios. O método das misturas sucessivas é referenciado por diversos autores (HELENE; TERZIAN, 1993; TUTIKIAN, 2007; RECENA, 2011) e bastante usado em práticas de dosagem de concreto.

O princípio fundamental do método é encontrar a combinação de agregados graúdos e miúdos que resulta na máxima densidade de empacotamento. O aumento da densidade de empacotamento minimiza a taxa de vazios e, como resultado, o consumo de pasta e de água pode ser reduzido.

O primeiro passo do método *PPM* é a separação dos agregados graúdos em diferentes classes, definidas pelo intervalo de tamanho das partículas. Em seguida, as duas classes mais grossas do agregado são combinadas experimentalmente, variando as proporções em massa, e determina-se a massa unitária, a densidade de empacotamento e a taxa de vazios de cada combinação. O processo é repetido adicionando as outras classes do agregado graúdo e, por fim, a areia. Então, a combinação que resulta na maior densidade de empacotamento é selecionada para a dosagem do concreto. Finalmente, o volume de pasta é calculado em função da taxa de vazios, considerando um excesso de pasta a fim de promover fluidez à mistura.

O *PPM* pode ser bastante eficaz uma vez que provê o empacotamento real de um conjunto granular, comparado a outros métodos que fornecem apenas medidas teóricas de empacotamento. Entretanto, sua aplicação prática é bastante dificultada devido à necessidade de peneiramento dos agregados em classes, pois exige trabalho laboratorial extenso, além de demandar grande quantidade de material.

Desde a proposição do método *PPM*, vários estudos têm sido realizados pelo grupo de pesquisadores que o desenvolveu. Inclusive, analisando o portfólio bibliográfico produzido a partir da revisão sistemática da literatura (Apêndice B), nota-se que grande parte dos artigos

que envolvem a dosagem de CAA com ARC por empacotamento de partículas compõem uma pesquisa extensa de investigação do método sob autoria desse grupo.

No trabalho em que Pradhan, Kumar e Barai (2017) propuseram o *PPM*, eles compararam a distribuição de partículas e as proporções obtidas experimentalmente pelo método com a curva teórica gerada a partir do modelo de Funk e Dinger (1994) para os mesmos intervalos de tamanho. Os resultados demonstraram que há uma boa correlação entre ambas. Adicionalmente, os pesquisadores também usaram as proporções obtidas experimentalmente para estimar a densidade de empacotamento teórica pelo modelo *CPM* (DE LARRARD, 1999). A densidade de empacotamento teórica não refletiu uma boa correlação com os resultados experimentais.

Sunayana e Barai (2017) também empregaram o *PPM* (PRADHAN, KUMAR E BARAI, 2017) para proporcionar misturas de CCV com 100% de AGR e incorporação de 20% e 30% de cinza volante. Repetindo as mesmas taxas de ARC e cinza volante também foram proporcionadas misturas pelo método normativo de dosagem da Índia. Pela dosagem obtida pelo método *PPM*, houve uma redução de 18% e 28% no teor de cimento para as misturas de CCV com ARC e substituição de 20% e 30% de cinzas volante, respectivamente, em comparação às misturas dosadas pelo método normatizado. Considerando a abordagem de dosagem pelo *PPM*, os pesquisadores observaram que a resistência à compressão aos 28 dias das misturas com ARC e cinza volante é comparável à mistura dosada somente com AN, pois há pouca variação dos resultados. Por exemplo, comparado ao concreto produzido com agregado natural, a mistura com 20% de cinza volante e 100% de AGR atingiu 95% da resistência à compressão de referência pelo método convencional e 93% pelo *PPM*.

Em outro estudo, Pradhan, Kumar e Barai (2019) avaliam o impacto do *PPM* nas propriedades de fratura de concretos com AN e concretos com ARC. Similar ao estudo anterior, as misturas proporcionadas pela abordagem do *PPM* foram produzidas seguindo as etapas do método *TSMA*. Os resultados demonstraram que o *PPM* teve um efeito positivo na carga de pico tanto para o concreto com AN quanto para o concreto com ARC. Além disso, os pesquisadores relataram que houve uma diferença insignificante (máximo de 0,7%) na energia de fratura das amostras de concreto com ARC proporcionadas pelo *PPM* quando comparadas as amostras de concreto com AN dosadas pelo método normativo indiano. Segundo eles, esse resultado sugere que a combinação do *PPM* com o *TSMA* reduziu as desvantagens das propriedades inferiores do ARC.

Recentemente, o mesmo grupo de pesquisadores também investigaram a influência do *PPM* e do *TSMA* em misturas de concreto a nível macro e microscópico (PRADHAN;

KUMAR; BARAI, 2020). Um dos experimentos conduzidos foi uma análise quantitativa de imagens microeletrônicas de elétrons retroespalhados. Analisando as imagens dos concretos proporcionados pelo *PPM* eles identificaram que a quantidade de cimento anidro próximo a interface do agregado é menor do que nos concretos dosados pelo método normativo. De acordo com os autores do estudo, isso poderia indicar que o método *PPM* minimizou o efeito parede no empacotamento das partículas de cimento. Porém, eles ressaltam que esse resultado também pode ser atribuído ao método de mistura *TSM*.

Vários estudos têm sido desenvolvidos seguindo a abordagem de maximizar a densidade de empacotamento dos agregados, tanto para dosagem de CAA quanto para dosagem de CCV com ARC. Contudo, a aplicação dos conceitos de empacotamento para a dosagem de composições de CAA contendo ARC ainda é um tema pouco explorado. Referente a esse assunto, poucos estudos foram encontrados na literatura. Um deles é o trabalho de Radhika *et. al.* (2017) que usou o *CPM* (DE LARRARD, 1999) para prever a densidade de empacotamento de misturas de CAA contendo 100% de AGR. Outro estudo é o de Cavalieri *et. al.* (2018) que empregou o modelo de empacotamento de Alfred com auxílio de um software computacional para dosar misturas de CAA com 20%, 50% e 100% de brita reciclada em substituição à natural.

Em um estudo nacional, Madduru *et. al.* (2017) formularam dosagens de CAA incorporando ARC a partir de um software que é fundamentado no modelo de Alfred. Empregou-se a taxa de 20% de substituição dos agregados naturais por AGR e AMR e adotou-se um coeficiente de distribuição $q = 0,25$, sugerido para misturas de CAA (VANDERLEI, 2004). Com a aplicação dos conceitos de empacotamento foi possível a redução de 22,93% no consumo de cimento e de 18,57% no consumo de aglomerante (CP V + SA).

Nota-se que a aplicação dos conceitos e modelos de empacotamento de partículas para dosagem de misturas de CAA com incorporação de ARC é uma técnica relativamente nova e que requer o desenvolvimento de novos estudos para contribuir com o avanço científico na área. Sobretudo, é nítido que há muitos estudos envolvendo dosagem de CAA contendo AGR, porém, o número de pesquisas que abordam dosagem de composições mistas de CAA combinando AGR e AMR é bem menor.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como objeto de estudo do programa experimental três composições de CAA foram formuladas, combinando o uso de agregados naturais e agregados reciclados. Cada concreto foi composto por um conjunto de agregados diferentes, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8 – Combinação de agregados usados nas dosagens de CAA

Código do CAA	Agregados miúdos	Agregados graúdos
CAA-01	Areia Natural + Areia Reciclada	Brita Reciclada
CAA-02	Areia Natural	Brita Reciclada
CAA-03	Areia Reciclada	Brita Natural

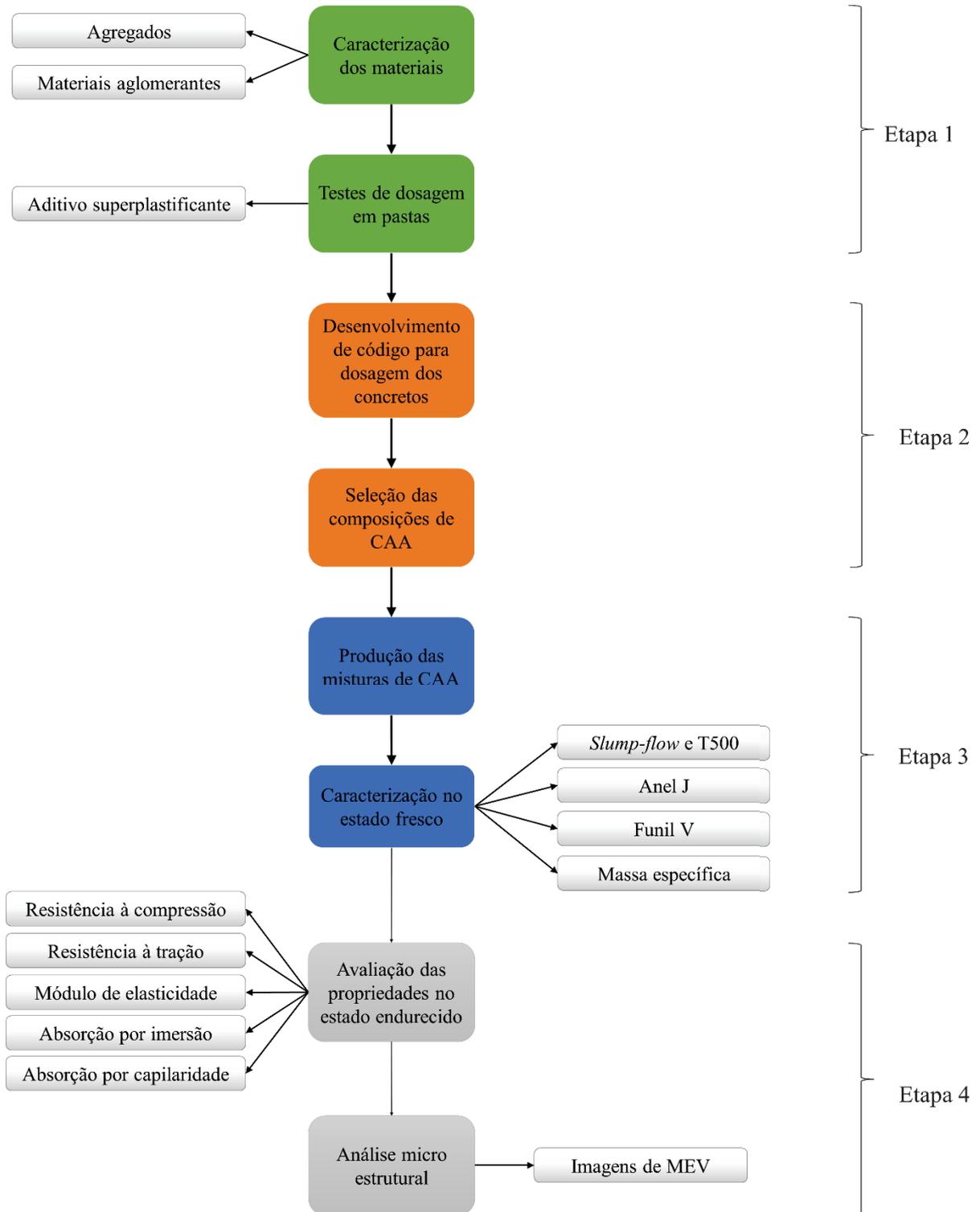
Fonte: O autor (2022)

Como os concretos foram dosados por empacotamento de partículas, nenhum parâmetro de dosagem foi fixado, ou seja, o consumo de nenhum material foi mantido igual para as três composições. Por esse motivo, optou-se por não produzir nenhum traço de referência, uma vez que não seria possível compará-lo com os outros três concretos.

O programa experimental foi dividido em quatro etapas. Na Etapa 1 foi realizada a caracterização dos agregados e dos materiais aglomerantes empregados na produção dos CAA e a realização de testes de dosagem em pastas. A etapa 2 se destinou ao desenvolvimento e execução do código para dosagem dos concretos por empacotamento de partículas e da seleção das composições de cada CAA. Na Etapa 3 os traços de cada CAA foram produzidos em laboratório e caracterizados quanto às propriedades no estado fresco. Por fim, a Etapa 4 foi destinada aos ensaios no estado endurecido e análise microestrutural das amostras.

Na Figura 15 a seguir é apresentado um fluxograma que ilustra as etapas que compõem o programa experimental da pesquisa.

Figura 15 – Fluxograma ilustrativo das etapas e atividades do programa experimental



Fonte: O autor (2022)

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregados

Para a produção dos concretos auto adensáveis que constituíram o programa experimental dessa pesquisa foram usados três agregados de origem natural e três agregados de RCD, sendo destes, quatro graúdos ($D_{\text{máx}} > 4,75 \text{ mm}$) e dois miúdos ($D_{\text{máx}} \leq 4,75 \text{ mm}$). Os agregados reciclados foram fornecidos por empresa de processamento de resíduos da construção civil, localizada na região de Curitiba/PR. A Figura 16 apresenta as imagens dos seis agregados.

Figura 16 – Agregados naturais e agregados reciclados utilizados para a produção dos concretos



Fonte: O autor (2022)

Os seis agregados foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica, teor de material pulverulento, massa unitária, massa específica e absorção de água. Cada ensaio foi realizado com duas ou mais repetições a fim de cumprir o critério normativo de repetitividade. Os resultados das duas repetições foram, então, utilizados para o cálculo do resultado final a partir de uma média aritmética dos dois valores individuais, observando se a variação entre os dois ficou dentro dos limites estabelecidos pelas respectivas normas.

As propriedades caracterizadas para cada agregado, as respectivas normas que estabelecem os procedimentos de ensaio que foram seguidos e o número de repetições de ensaio estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Ensaio realizados para caracterização dos agregados

Agregados	Propriedade	Norma	Nº de repetições do ensaio
Miúdos e Graúdos	Composição Granulométrica (-)	ABNT NBR NM 248 (2003a)	3
	Dimensão Máxima Característica (mm)		
	Módulo de Finura (-)		
	Teor de material pulverulento (%)	ABNT NBR NM 46 (2003b)	2
	Massa unitária (kg/m ³)	ABNT NBR NM 45 (2006)	2
Índice de vazios (%)			
Miúdos	Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR NM 52 (2009b)	2
	Massa específica aparente (g/cm ³)		
	Absorção de água (%)	ABNT NBR NM 30 (2001)	2
Graúdos	Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR NM 53 (2009c)	2
	Massa específica aparente (g/cm ³)		
	Absorção de água (%)		

Fonte: O autor (2022)

Devido ao elevado teor de material pulverulento dos agregados de RCD, as amostras das duas britas foram divididas em uma fração graúda e uma fração miúda e os ensaios de determinação da massa específica e de absorção foram realizados separadamente para cada fração, seguindo os procedimentos específicos para agregado graúdo e agregado miúdo. O resultado final de massa específica e absorção foram calculados a partir do balanceamento dos resultados individuais de cada fração, conforme indicado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009c).

Os resultados de caracterização dos seis agregados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização dos agregados naturais e dos agregados reciclados usados na pesquisa

Propriedade	Brita #1 Natural	Brita #0 Natural	Areia Natural	Brita #1 RCD	Brita #0 RCD	Areia RCD
Dimensão máxima característica (D _{máx})	19,0 mm	9,50 mm	4,75 mm	25,0 mm	19,0 mm	4,75 mm
Módulo de finura	6,76	5,67	2,64	6,59	5,43	2,04
Teor de pulverulento (%)	0,18%	1,06%	5,17%	8,44%	11,76%	29,26%
Massa unitária (g/cm ³)	1,53	1,48	1,59	1,28	1,31	1,36
Massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	2,67	2,63	2,50	2,27	2,26	1,95
Massa específica do agregado SSS (g/cm ³)	2,68	2,65	2,54	2,40	2,40	2,19
Massa específica (g/cm ³)	2,70	2,68	2,59	2,61	2,62	2,57
Absorção (%)	0,40%	0,80%	1,36%	5,88%	6,07%	12,20%
Absorção da fração graúda (> 4,75 mm) (%)	-	-	-	5,14%	4,74%	-
Absorção da fração miúda (< 4,75 mm) (%)	-	-	-	12,47%	11,87%	-

Fonte: O autor (2022)

Dentre os resultados obtidos, certamente os que mais se destacam são os teores de material pulverulento identificados para os agregados reciclados. Verifica-se também que há certa diferença entre os agregados de RCD e os agregados naturais em relação as propriedades de massa específica e absorção, o que já era esperado conforme dados de outros estudos apresentados na tabela 3 (ver 2.1.3.1). A exemplo, a massa específica da brita #1 de RCD é cerca de 3,3% inferior à da brita #1 natural.

Os resultados de absorção são ainda mais expressivos. A absorção da brita #1 de RCD é superior à absorção da brita #1 natural em cerca de 14,7 vezes maior. Essa diferença chega a ser maior do que a de todos os estudos apresentados na tabela 3 para agregados graúdos. Com relação as duas britas #0 e as duas areias, as diferenças percentuais são de 762% e 898%, respectivamente. Na literatura são mostradas diferenças percentuais ainda maiores entre agregados miúdos naturais e reciclados.

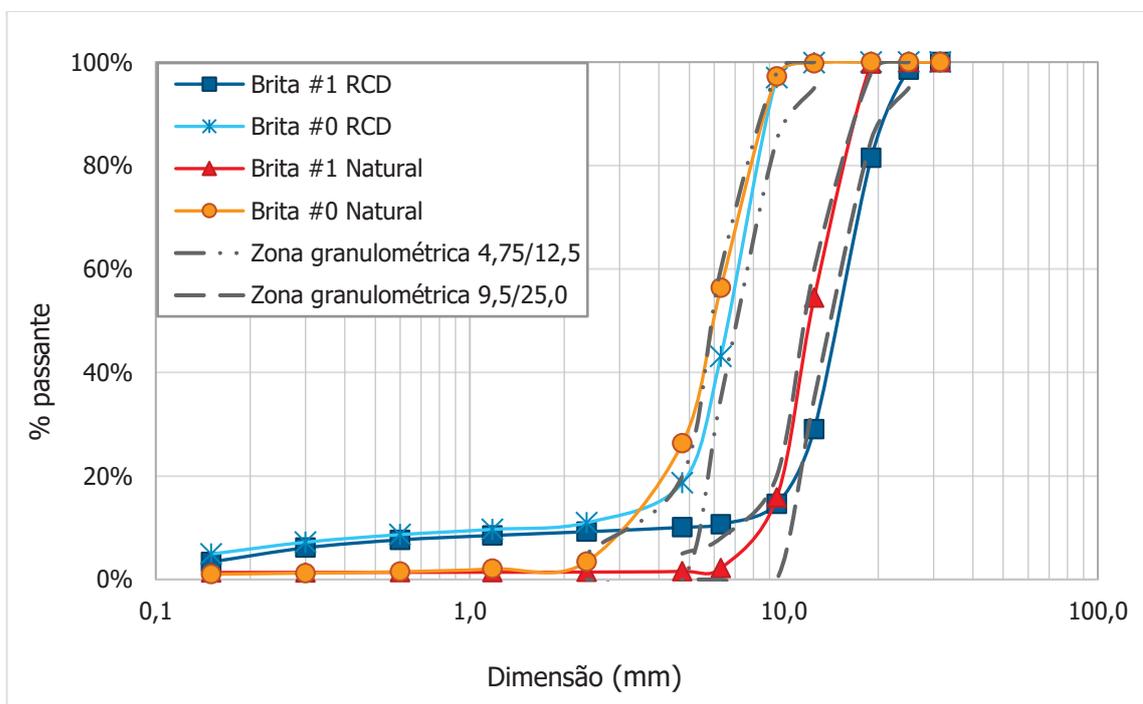
Para dosar os concretos por empacotamento de partículas são requeridas as curvas granulométricas de todos os materiais sólidos que constituem a mistura. Diante disso e devido ao elevado teor de material pulverulento contido nos agregados reciclados foi necessário

determinar a curva granulométrica completa de cada material, incluindo não só a fração mais grossa (partículas maiores que 75 μm), mas também a fração mais fina (menor que 75 μm).

Após realizado o ensaio de granulometria dos três agregados reciclados por peneiramento foram separadas, de cada um, amostras de material pulverulento (material passante na peneira n° 200). Essas amostras foram ensaiadas pela técnica de granulometria à laser para determinação da curva de distribuição de partículas inferiores à 75 μm . O equipamento utilizado para realização do ensaio foi um granulômetro do modelo Cilas 920 com faixa de medição de 0.30 μm a 400.00 μm e divisão em até 30 classes. O preparo das amostras consistiu na dispersão do material em água, sem uso de outro agente dispersante.

Na Figura 17 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados graúdos naturais e reciclados, compreendidas no intervalo de 31,5 mm (peneira 1.1/4") a 0,15 mm (peneira n° 200). Também são exibidas as curvas de referência padronizadas pela NBR 7211 (ABNT, 2011a).

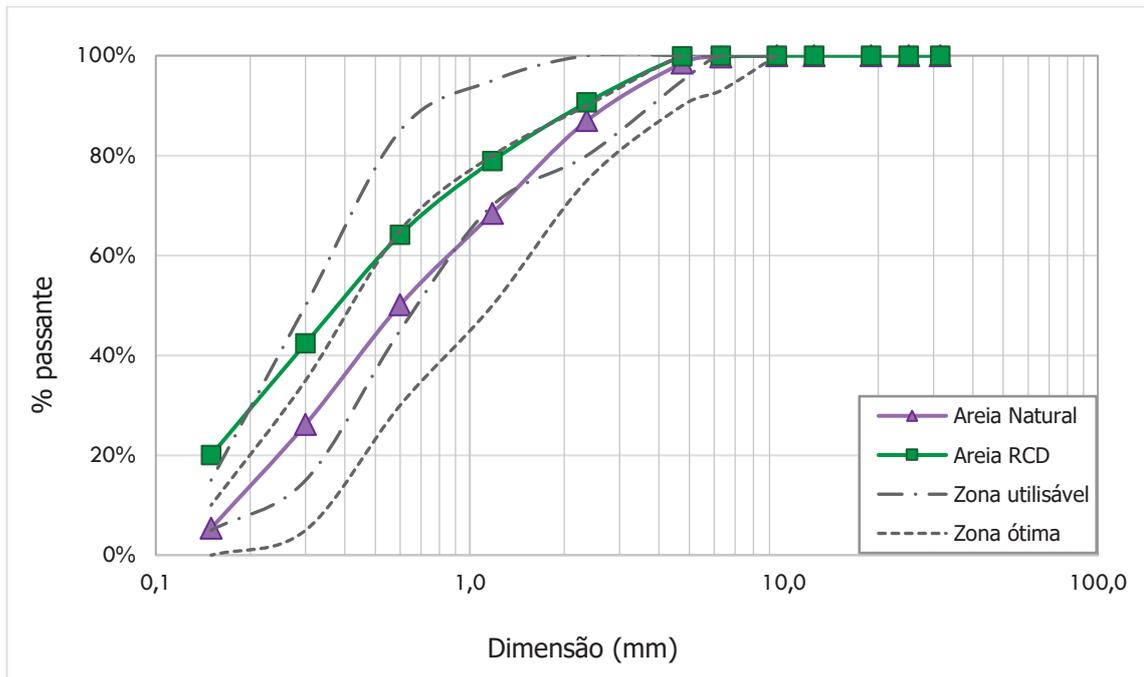
Figura 17 – Curvas granulométricas das britas naturais e britas recicladas utilizadas na pesquisa



Fonte: O autor (2022)

Na Figura 18 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados miúdos naturais e reciclados, compreendidas no mesmo intervalo mencionado acima.

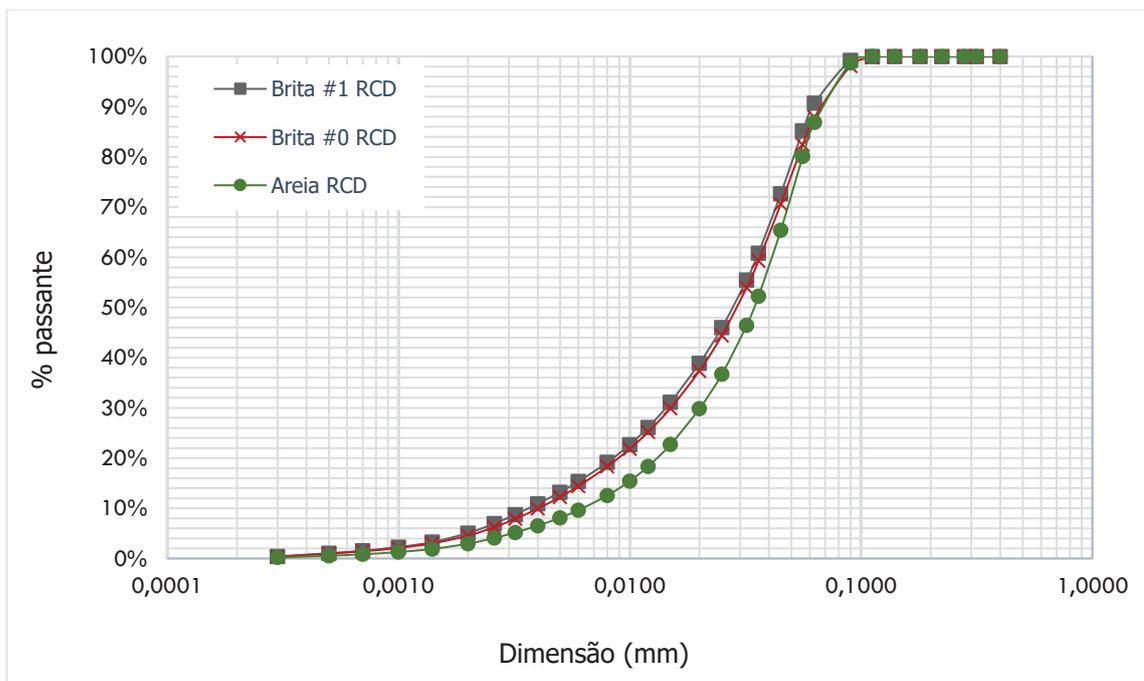
Figura 18 – Curvas granulométricas da areia natural e da areia reciclada utilizadas na pesquisa



Fonte: O autor (2022)

Na Figura 19 são apresentadas as curvas granulométricas da fração pulverulenta dos agregados reciclados (britas e areia), compreendendo o intervalo de 400 μ m a 0,30 μ m.

Figura 19 – Curvas granulométricas das frações de material pulverulento dos agregados reciclados



Fonte: O autor (2022)

Além dos ensaios acima listados, o agregado reciclado graúdo foi ensaiado para determinação de sua composição e classificação quanto ao tipo de resíduo que o constitui predominantemente, conforme procedimento indicado pela NBR 15116 (ABNT, 2021a). A técnica de ensaio consiste em separar manualmente cada fragmento presente na amostra em quatro grupos e determinar a massa de cada um.

O ensaio foi realizado em duas amostras da Brita #1 de RCD ($D_{\text{máx}}$ 19,0 mm). Os fragmentos foram analisados visualmente para identificar o grupo pertencente e, após separação de todos os fragmentos da amostra, foi determinada a massa de cada grupo e as porcentagens em relação à massa total. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11 e na Figura 20 se apresenta cada grupo de fragmentos após a separação da amostra total.

Tabela 11 – Classificação do agregado de RCD quanto aos resíduos constituintes

Grupo	Amostra 1	Amostra 2	Limites da NBR 15116	
			ARCO	ARCI
G ₁	36,74%	35,14%	-	-
G ₂	59,97%	61,10%	-	-
G ₃	2,35%	2,80%	0%	< 10%
G ₄	0,93%	0,95%	< 1%	
TOTAL	100,0%	100,0%	-	-

Fonte: O autor (2022) e NBR 15116 (ABNT, 2021a)

Figura 20 – Grupo de fragmentos do agregado de RCD após separação manual



Fonte: O autor (2022)

De acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2021a) e a partir dos resultados obtidos para brita ensaiada, verifica-se que o agregado reciclado pertence à subclasse ARCI – agregado reciclado cimentício. Pela Figura 18 também é possível observar que os fragmentos pertencentes aos grupos G₁ e G₂ representam a maior parte da amostra, indicando que o agregado é predominantemente constituído por materiais cimentícios e frações de rochas naturais.

Comparando os resultados de caracterização obtidos para os agregados reciclados (Tabela 11) com os requisitos da NBR 15116 (Tabela 1), verifica-se que a areia de RCD excede os limites estabelecidos para o teor de material pulverulento e para a absorção de água. A diferença mais expressiva é para o teor de material pulverulento uma vez que o valor determinado foi de 29,26%, enquanto o limite máximo estabelecido por norma é de 12% para ARCI.

3.1.2 Materiais aglomerantes

Os materiais aglomerantes usados na produção dos CAAs foram: Cimento Portland V - de Alta Resistência Inicial (CP V- ARI), Cinza Volante (CV) e Sílica Ativa (SA). A CV e SA foram empregadas nas dosagens dos concretos visando contribuir com a resistência mecânica a partir das reações pozolânicas.

O cimento CP V-ARI foi escolhido para as composições de CAA por conter de 90-100% de clínquer e sulfatos de cálcio e 0-10% de filler calcário (ABNT NBR 16697, 2018b).

As principais propriedades físicas, químicas e mecânicas do CP V-ARI foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Características químicas, físicas e mecânicas do CP V ARI

(continua)

Características químicas						
Teor de MgO (%)		Teor de SO ₃ (%)		Perda ao Fogo (%)		Resíduo insolúvel (%)
6,4		3,3		3,9		0,80
Características físicas						
Finura #200	Finura #325	Superfície esp. de Blaine (g/cm ²)	Água de consistência da pasta (%)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Expansibilidade à quente (mm)
0,1	1,0	5033	26,6	233 ± 5	296 ± 15	0,2

Tabela 12 – Características químicas, físicas e mecânicas do CP V ARI

(conclusão)

Características mecânicas: Resistência à compressão (MPa)			
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
23,2	33,5	38,8	47,5

Fonte: Boletim de ensaios (Votorantim, jan/2021)

Conforme explicado anteriormente, a dosagem de concretos auto adensáveis demanda um consumo mais elevado de materiais finos. Portanto, a CV e SA foram usadas como adições a fim de possibilitar a redução do consumo de cimento nas dosagens dos concretos e, ainda assim, prover à mistura quantidade satisfatória de finos, de modo a obter as características desejadas de auto adensabilidade e resistência mecânica.

Em particular, o principal fator que motivou o uso da CV foi a intenção de promover maior fluidez às misturas de concreto. É reconhecido no meio técnico-científico que as propriedades físicas da CV, especialmente, o formato e o tamanho, têm um efeito considerável nas propriedades de misturas à base de CP.

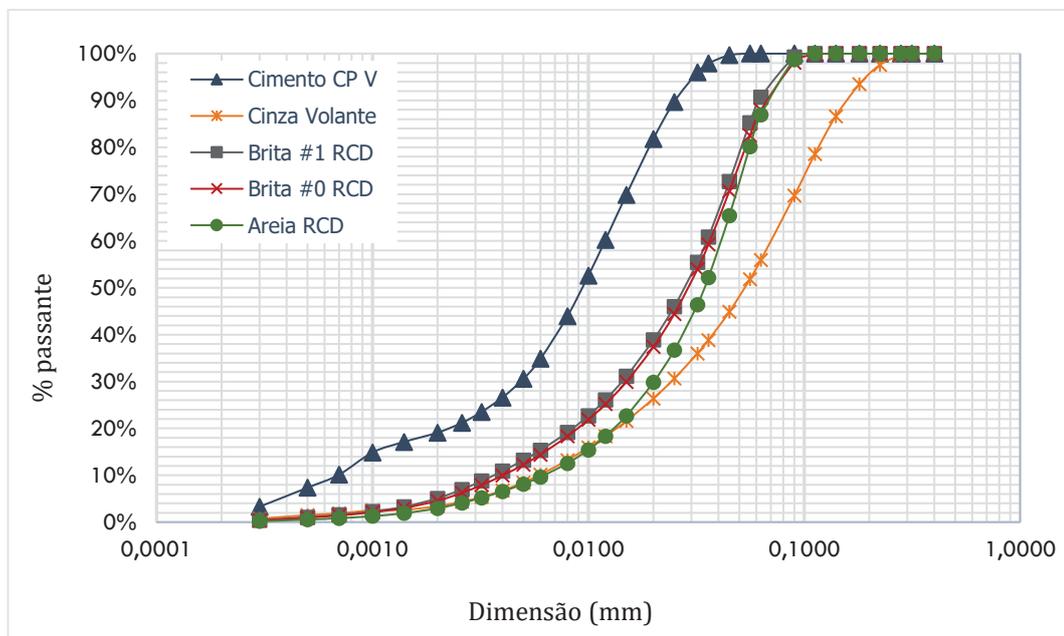
Primeiro, porque a reação química mais lenta resulta na formação tardia dos produtos de hidratação nas primeiras idades, o que proporciona maior plasticidade à mistura (LEE, C.; LEE H.; LEE K., 2033). Além disso, o formato esférico das partículas de CV facilita o movimento das partículas da mistura e promove o efeito de rolamento entre elas, promovendo maior fluidez (HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017). Inclusive, Kashani *et al.* (2014) ressaltam que a utilização da CV pode ser considerada mais vantajosa do que o uso de aditivos superplastificantes, pois é uma alternativa mais econômica e gera menor impacto ambiental.

O CP V-ARI e a CV também foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica pelo ensaio de granulometria a laser. O ensaio também foi executado com o granulômetro do modelo Cilas 920. Na tentativa de realização do ensaio de granulometria à laser na SA, verificou-se que a dimensão das partículas presentes na amostra excedia a faixa granulométrica de análise do granulômetro, o que impossibilitou a execução do ensaio. Isso ocorreu porque a SA foi fornecida em condição densificada, cujo grãos ficam aglomerados. Segundo o fabricante, é comum que a sílica comercializada seja submetida a um processo de densificação, pois esse processo promove a aglomeração intencional dos grãos a fim de reduzir o volume de material e facilitar o processo de ensacagem.

Na tentativa de desaglomerar os grãos em uma fração do material e coletar nova amostra para ensaio, porém houve grande dificuldade de realizar o procedimento sem água. Mesmo passando o material na peneira n° 200, observou-se que havia rápida reaglomeração dos grãos. Devido a essa dificuldade, optou-se por não realizar o ensaio de granulometria a laser na SA e adotar uma porcentagem de substituição em relação à massa de cimento recomendada pela literatura nas dosagens dos concretos.

As curvas granulométricas do CP V-ARI e da CV são apresentadas na Figura 21. Para fins de comparação as curvas granulométricas da fração pulverulenta dos agregados reciclados também são mostradas no gráfico.

Figura 21 – Curva granulométrica dos materiais finos



Fonte: O autor (2022)

Comparando as duas curvas é possível observar que a distribuição de partículas dos dois materiais é diferente e se complementa, o que contribui para o empacotamento de partículas do conjunto através do efeito filer.

Os três materiais aglomerantes também foram ensaiados pelo método de Le Chatelier para determinação da massa específica, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017f). Utilizou-se querosene como líquido não reagente para dispersão das partículas. O ensaio foi repetido duas vezes para cada material, conforme exigido por norma, e os resultados foram calculados a partir da média aritmética. As massas específicas dos três materiais são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica dos materiais aglomerantes

Material	Massa específica (g/cm³)
CP V-ARI	3,14
CV	2,06
SA	2,18

Fonte: O autor (2022)

3.1.3 Aditivo superplastificante

Um aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilatos foi utilizado a fim de promover melhor fluidez às misturas de CAA mediante dispersão das partículas finas aglomeradas. Conforme indicado pelo fabricante na ficha técnica do produto, o aditivo líquido tem massa específica de 1,09 kg/dm³ e o intervalo de dosagem recomendado é de 0,5% a 5,0%.

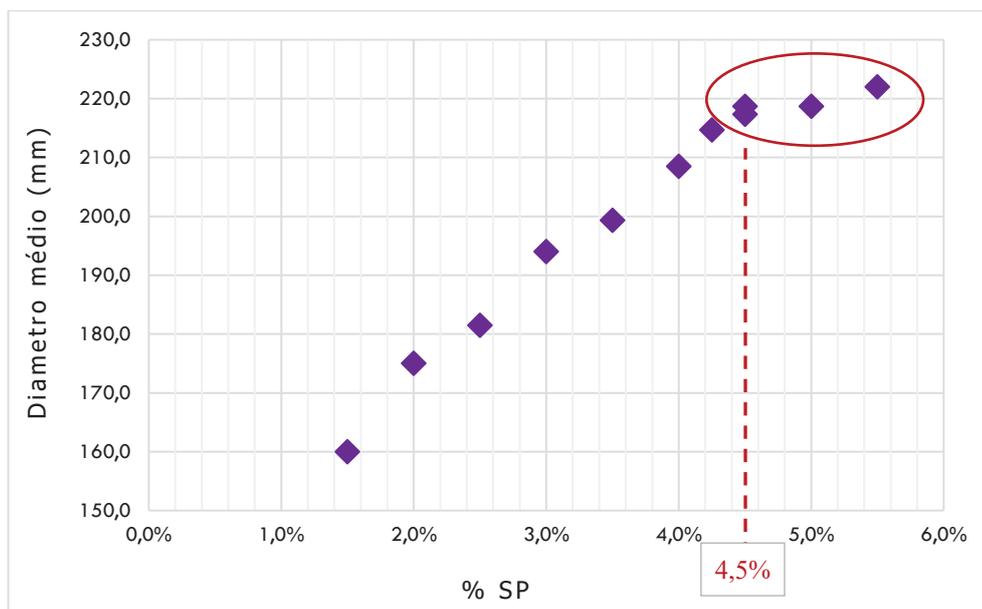
3.1.3.1 *Teste do ponto de saturação*

Para definir a dosagem de aditivo superplastificante das misturas foi determinado o ponto de saturação do produto para o cimento Portland através do teste do mini cone de Kantro (KANTRO, 1980). O método tem a vantagem de demandar menor quantidade de material para o ensaio e permite identificar o ponto de saturação do aditivo através da medida de espalhamento da pasta ensaiada, similar ao método de abatimento do concreto (MONTE, 2003).

Para realização do teste foram produzidas pastas com 150 gramas de cimento e 60 gramas de água (relação a/c = 0,40), variando o teor de SP a cada 0,5% em relação a massa de cimento. O intervalo de dosagem testado foi de 1,0% a 5,5% de SP. A cada pasta produzida, foram determinadas duas medidas de abertura e calculado o diâmetro médio.

Na Figura 22 é apresentada a curva obtida no teste, relacionando o teor de SP testado com o diâmetro de espalhamento obtido.

Figura 22 – Curva do ponto de saturação do aditivo SP



Fonte: O autor (2022)

O ponto de saturação do aditivo é definido como a dosagem além da qual não ocorre um aumento significativo da fluidez, medida através do espalhamento da pasta. Sendo assim, pelo gráfico é possível identificar que esse ponto corresponde ao teor de 4,5%, pois para as dosagens subsequentes a variação do diâmetro foi praticamente nula.

3.1.3.2 Efeito do aditivo frente ao uso de adições

Dado que as composições de CAA contêm elevado teor de finos, julgou-se importante investigar se o potencial de ação do aditivo na presença de outros materiais finos. Dessa forma, além do ponto de saturação, outro teste foi realizado para avaliar o efeito do aditivo em pastas produzidas exclusivamente com adições, neste caso, a cinza volante ou a sílica ativa.

Para cada adição (CV e SA) foi produzida uma pasta de 150 ml para determinação de duas medidas de espalhamento por meio do teste do mini cone de Kantro para fins de comparação, uma antes da adição do SP na mistura e outra depois. As pastas foram produzidas adotando relação água/adicação de 0,40 (em massa) e teor de aditivo de 1% em relação à massa da adição usada. Para a pasta de sílica ativa, antes da adição do SP na mistura, foi necessário aumentar a relação a/c para 0,7, pois a consistência da pasta estava muito seca e o efeito do aditivo seria inviabilizado.

O procedimento de mistura das pastas foi dividido em duas etapas. Primeiramente, despejou-se dentro da cuba da argamaseira o volume total de água, seguido pela quantidade total da adição, e em seguida, misturou-se exclusivamente os dois materiais em velocidade baixa por dois minutos. Concluído o tempo de mistura, a pasta foi ensaiada pelo teste do mini cone de Kantro para determinar a medida de espalhamento sem o aditivo. Na segunda etapa, a pasta foi retornada à cuba e a quantidade de aditivo correspondente ao teor de 1% em relação à massa de adição foi inserido na mistura. A pasta foi misturada por mais dois minutos e então, novamente foi realizado o teste de consistência.

Nas Figuras 23 e 24 são apresentados os registros das pastas antes e após a adição do aditivo na mistura.

Figura 23 – Teste do aditivo SP na pasta de cinza volante. (a) Pasta sem aditivo. (b) Pasta com 1% de SP.

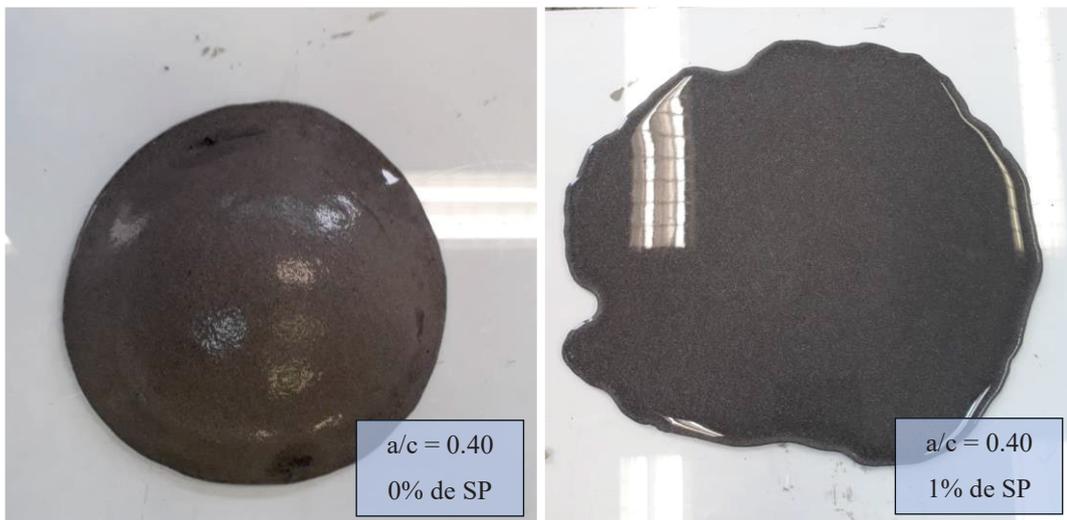
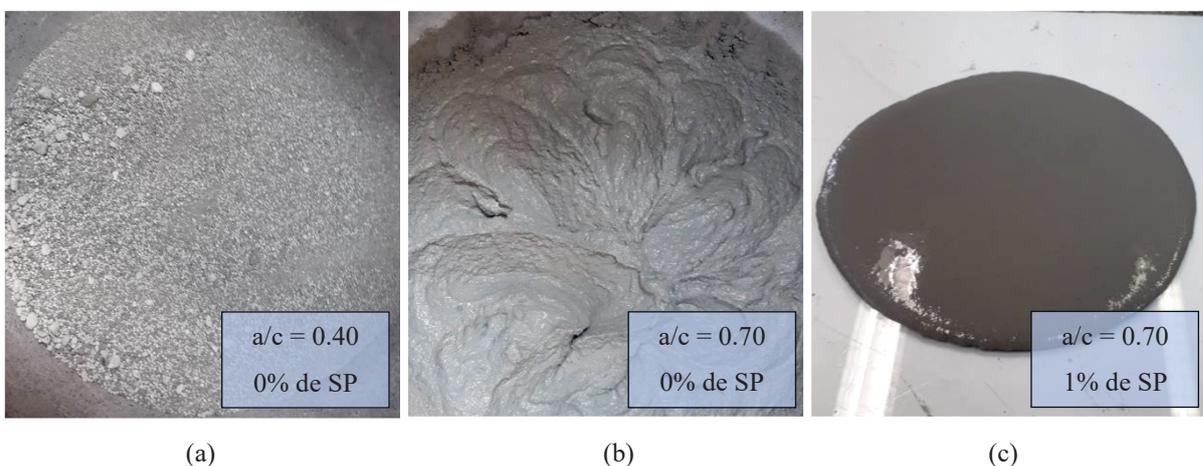


Figura 24 – Teste do aditivo SP na pasta de sílica ativa. (a) Pasta com a/c de 0.40 sem SP. (b) Pasta com a/c de 0.70 sem SP. (c) Pasta com a/c de 0.70 e 1% de SP.



Comparando os resultados obtidos em cada etapa, pôde-se verificar que o aditivo também aumenta a fluidez das pastas contendo CV ou SA ao invés de cimento. Essa análise foi fundamental para orientar a dosagem do aditivo durante os procedimentos de mistura de cada um dos concretos da pesquisa.

3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

De acordo com o objetivo definido para a pesquisa, as dosagens dos concretos foram formuladas a partir de empacotamento de partículas. Para tanto, foi empregado o modelo de empacotamento de Alfred. Conforme descrito em 2.2.1.1, para um dado conjunto granular, admitindo limites máximo e mínimo do intervalo de dimensão de partículas, o modelo propõe uma curva de distribuição granulométrica otimizada. A expressão que descreve o modelo de Alfred é apresentada conforme Equação 5⁵.

Os dados de entrada para aplicação do modelo são: (1) os diâmetros do intervalo granulométrico de todo o conjunto granular do concreto, composto pelos agregados e pelos materiais aglomerantes, o módulo de distribuição q .

Atribuindo esses dados às variáveis da equação do modelo de Alfred, obtém-se a curva ótima de distribuição granulométrica para o conjunto granular estudado. Essa curva é expressa em porcentagens ideais de material para cada dimensão de partícula.

Definida a curva ótima, o passo seguinte é encontrar uma composição que melhor a satisfaça a partir da combinação de proporções dos materiais que constituem o conjunto granular. Para isso, diversas combinações aleatórias devem ser testadas variando as proporções de cada material até encontrar uma composição cuja distribuição granulométrica resultante se ajuste ao máximo à curva ótima gerada a partir do modelo de Alfred.

3.2.1 Código de simulação de Monte Carlo

Levando em consideração que um número elevado de possibilidades de combinações deve ser testado, seria relativamente impraticável criar simulações aleatórias uma a uma até encontrar uma combinação que melhor satisfaça o modelo de Alfred, principalmente porque o processo teria que ser realizado individualmente para cada composição de concreto.

⁵ Ver 2.2.1.1

Buscando otimizar esse processo, um código foi programado com a funcionalidade de executar múltiplas possibilidades de combinações até encontrar, matematicamente, a que melhor se ajuste à curva dada pelo modelo de Alfred. Como se trata da resolução de um problema matemático, um dos recursos lógicos usados no código foi o método de simulação probabilística de Monte Carlo (MMC), que se baseia no uso de amostragem aleatória.

Conforme explicado por Kalos e Whitlock (2009), o método de Monte Carlo é um método estocástico que envolve o uso de números aleatórios para efetuar um cálculo que tem a estrutura de um processo estocástico. Esses processos são definidos por uma sequência de estados cuja evolução é determinada por eventos aleatórios. Em simulações computacionais, esses eventos são gerados por um algoritmo que, por sua vez, gera uma sequência de números pseudo-aleatórios.

O código foi programado na linguagem *Python*. O desenvolvimento e execução foram realizados no *Google Colaboratory*, também conhecido como *Google Colab* (GOOGLE, 2022). Optou-se pelo uso dessa ferramenta devido a vantagem de desenvolver códigos em *Python* de maneira online, sem a necessidade de *download* ou instalação de qualquer *software*.

A estrutura lógica do algoritmo que deu origem ao código é dividida em quatro etapas sequenciadas conforme descrito abaixo:

(1) Importação dos dados de entrada

A primeira etapa do código é efetuar a importação das curvas de distribuição granulométrica de cada material escolhido para compor a mistura.

(2) Atribuição de proporções para cada material por aleatoriedade

A partir do número de possibilidades a serem testadas, que é definido pelo usuário, e baseado no MMC, o código gera valores aleatórios para a proporção de cada material do conjunto granular. Esses valores são armazenados em uma lista para cada material e, enfim, são usados na etapa subsequente.

(3) Comparação da distribuição granulométrica real com a curva de Alfred pelo método dos mínimos quadrados

Nessa etapa o algoritmo aplica a equação do método dos mínimos quadrados para cada dimensão de partículas do intervalo granulométrico. O resultado da diferença entre o valor teórico (modelo de Alfred) e o valor real (dados experimentais) é chamado de resíduo (RSS). Por fim, calcula-se a soma dos resíduos de cada dimensão (Σ RSS). Esse valor é um indicador matemático do ajuste entre a curva proposta pelo modelo e a curva resultante da composição gerada pelo código. Quanto menor o valor de Σ RSS, maior é proximidade entre a curva obtida pela combinação dos materiais e a curva ótima resultante da aplicação do modelo de Alfred. Esse procedimento já foi usado previamente para a dosagem de concretos (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015; PEREIRA, 2010).

(4) Retorno dos dados de saída

O código executa as etapas (2) e (3) repetidamente conforme o número de vezes pré-definido pelo usuário. Neste trabalho, utilizou-se 1 milhão de repetições. Ao final são retornadas as proporções de cada material do conjunto granular que resultaram no menor valor de Σ RSS, ou seja, a composição que mais se ajusta à distribuição granulométrica ótima, dada pelo modelo de Alfred, para o coeficiente de distribuição q escolhido.

3.2.2 Dados de entrada adotados

As três composições de CAA foram formuladas separadamente, pois cada uma foi formulada com uma combinação de materiais diferente. Para isso, o código desenvolvido foi replicado três vezes adequando as curvas granulométricas dos materiais às respectivas combinações escolhidas. Os dados de entrada adotados em cada código podem ser entendidos como as variáveis independentes do estudo e são apresentados na tabela 14. A escolha de cada um é justificada na sequência.

Tabela 14 – Variáveis independentes adotadas na dosagem dos concretos

Variável	CAA-01	CAA-02	CAA-03
Módulo de distribuição	$q = 0,25$		
Conjunto de agregados	Brita #1 RCD Brita #0 RCD Areia RCD Areia Natural	Brita #1 RCD Brita #0 RCD Areia Natural	Brita #1 Natural Brita #0 Natural Areia RCD
Conjunto de aglomerantes	Cimento Sílica Ativa	Cimento Cinza Volante Sílica Ativa	Cimento Cinza Volante Sílica Ativa
Restrições	% Areia RCD > % Areia Natural	Nenhuma	Nenhuma

Fonte: O autor (2022)

Como o escopo da pesquisa está direcionado ao estudo de concretos auto adensáveis, nos três códigos foi adotado o valor de $q = 0,25$ no cálculo da equação do modelo de Alfred, conforme recomendado por Vanderlei (2004), a fim de obter dosagens com consumo de finos apropriado para esse tipo de concreto.

A princípio, a dosagem da primeira composição (CAA-01) seria formulada com substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados a fim de otimizar ao máximo o uso desse material. No entanto, as dosagens formuladas com 100% de agregados reciclados geraram composições com elevado teor de finos devido à grande quantidade de material pulverulento contida nesses agregados. Isso implicaria uma mistura com elevada demanda de água para obter características de auto adensabilidade, mesmo com uso de SP, porém, dificultaria a obtenção de um CAA com resistência mecânica estrutural.

Por esse motivo, optou-se por substituir uma parte da areia reciclada por areia natural a fim de balancear o teor de finos da composição. Além disso, diferente do CAA-02 e do CAA-03, optou-se por não incluir a cinza volante na composição.

Como não foi possível determinar a distribuição granulométrica da sílica ativa, o material foi adicionado às três misturas substituindo 10% da massa de cimento, que é um teor recomendado na literatura e usualmente adotado para produção de concretos.

Visto que o código gera números aleatoriamente, os dados de saída retornados em cada execução podem ser similares, mas nunca são completamente iguais. Dessa forma, os códigos referentes à cada composição de concreto foram executados diversas vezes com o

objetivo de analisar algumas combinações antes da seleção definitiva. Essa análise levou em consideração o ajuste com o modelo de Alfred, indicado pelo resíduo total (ΣR_{SS}), e se os consumos de materiais se adequam aos limites recomendados para dosagem de CAA.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

A partir das proporções retornadas pelo código para cada conjunto granular, calculou-se as quantidades de cada material sólido para produzir as três misturas de CAA.

3.3.1 Dosagem de água e de aditivo SP

Inicialmente, a relação a/agl e o teor de aditivo SP adotados para as três misturas foi de 0,40 e 5%, respectivamente. A quantidade de água inserida nas misturas foi compensada em função da taxa de absorção dos agregados reciclados, conforme recomendado pela NBR 15116 (ABNT, 2021a), a fim de evitar perda de fluidez dos concretos.

Para calcular o consumo inicial de água para cada mistura, foi admitido o valor correspondente a 80% da taxa de absorção de cada agregado reciclado usado. Esse valor é expresso pelo coeficiente K1 da equação 1 dada pela NBR 15116 (ABNT, 2021a)⁶.

No decorrer da mistura dos materiais, a quantidade de água e de SP foram ajustadas efetuando acréscimos gradativos até obter as propriedades de auto adensibilidade desejadas (fluidez, habilidade passante e resistência à segregação).

Conforme verificado nos testes realizados com pastas de cinza volante e sílica ativa, a ação do SP também é efetiva para dispersão das partículas dessas adições. Baseado nesse resultado, a dosagem do aditivo foi feita admitindo não só a massa de cimento, mas também as massas de adições.

⁶ Ver 2.2.1.1

3.3.2 Procedimento de mistura

As composições de CAA foram produzidas em betoneira de eixo horizontal com capacidade de 250 litros.

Além da compensação de água devido à elevada absorção dos ARCI, todas as misturas foram produzidas adotando uma adaptação do método *T SMA* para concretos auto adensáveis, conforme sugerido por Rajhans, Panda e Nayak (2018). O procedimento de mistura dos materiais adotado na produção dos concretos é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Sequência de mistura dos materiais para produção do CAA



Fonte: Adaptado de Rajhans, Panda e Nayak (2018)

3.3.3 Moldagem dos corpos-de-prova

Finalizado o processo de mistura e os ensaios de caracterização do estado fresco, detalhados em 3.4.1, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, destinados aos ensaios de caracterização no estado endurecido. O número de corpos-de-prova que foram moldados para cada CAA é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Número de corpos-de-prova do programa experimental

Propriedades	Idades de ensaio (dias)	CAA-01	CAA-02	CAA-03
Resistência à compressão	28	4	4	4
	90	5	5	5
Resistência à tração por compressão diametral	90	4	4	4
Módulo de elasticidade estático	28	4	4	4
Absorção por imersão	90	3	3	3
Absorção por capilaridade	90	3	3	3
Nº de corpos-de-prova para cada CAA		23	23	23
Nº total de corpos-de-prova		69		

Fonte: O autor (2022)

Ressalta-se que a moldagem não envolveu nenhum método de adensamento, somente a ação do próprio peso do concreto. Decorridas 24 horas após a moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e armazenados imersos em água para o processo de cura, onde permaneceram até a idade de cada ensaio.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram retificados para regularização da superfície a fim de assegurar a aplicação uniforme da carga durante o ensaio.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

3.4.1 Estado Fresco

Logo após o processo de mistura, os três CAA foram ensaiados quanto às propriedades do estado fresco que caracterizam misturas auto adensáveis. As propriedades que foram avaliadas e os respectivos métodos de ensaio e limites normativos recomendados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Ensaio de caracterização dos concretos no estado fresco

Propriedade	Método	Norma de ensaio (ano)	Classificação da NBR 15823-1 (2017a)	Limites da NBR 15823-1 (2017a)
Fluidez	<i>Slump-flow</i> (mm)	NBR 15823-2 (2017b)	SF 1	550 – 650 mm
			SF 2	660 a 750 mm
			SF 3	760 a 850 mm
Coesão	Índice de estabilidade visual (IEV)	NBR 15823-5 (2017e)	IEV 0	ªDefinições
			IEV 1	
			IEV 2	
Viscosidade	Tempo de escoamento – T500 (seg)	NBR 15823-3 (2017c)	VS 1	≤ 2 seg
			VS 2	> 2 seg
	Funil V (seg)		VF 1	< 9 seg
			VF 2	9 a 25 seg
Habilidade Passante	Anel J (mm)		PJ 1	0 a 25 mm
			PJ 2	25 a 50 mm

ª Classes de índice de estabilidade visual estabelecidas pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a):

- **IEV 0** (Altamente estável): sem evidência de segregação ou exsudação;
- **IEV 1** (Estável): Sem evidência de segregação e leve exsudação;
- **IEV 2** (Instável): Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto;
- **IEV 3** (Altamente instável): Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassas nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm).

Fonte: O autor (2022)

Os resultados obtidos para cada concreto nos ensaios acima listados foram avaliados em relação aos limites normativos da NBR 15823-1 (ABNT, 2017b) para verificar se a mistura se caracterizava como autoadensável.

3.4.2 Estado Endurecido

No estado endurecido os concretos foram avaliados quanto às propriedades apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Ensaio de caracterização dos concretos no estado endurecido

Propriedade	Idades de ensaio	Norma (ano)
Resistência à compressão axial	28 e 90 dias	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Módulo de elasticidade estático	28 dias	NBR 8522-1 (ABNT, 2021b)
Resistência à tração por compressão diametral	90 dias	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Absorção de água por imersão	90 dias	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Absorção de água por capilaridade	90 dias	NBR 9779 (ABNT, 2012)

Fonte: O autor (2022)

Previamente ao ensaio de determinação da resistência à compressão axial e de módulo de elasticidade os corpos-de-prova foram retificados para regularização das superfícies de base e topo a fim de garantir a aplicação uniforme da carga durante os ensaios.

A idade de 90 dias foi selecionada para ensaiar a maior parte das amostras devido à adição de cinza volante e sílica ativa nas dosagens. Como as reações pozolânicas são mais lentas do que as reações de hidratação do cimento, a velocidade de desenvolvimento da resistência mecânica também é menor e após os 28 dias de idade ainda pode haver uma taxa de crescimento considerável.

A partir dos valores de resistência à compressão obtidos nas duas idades, os concretos também foram avaliados quanto à ecoeficiência através do indicador BI, calculado a partir da relação entre o consumo total de aglomerantes e a resistência à compressão do traço, conforme Equação 6 a seguir:

$$BI = \frac{\sum \text{agl}}{RC} = \frac{\sum \text{CP+CV+SA}}{RC} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

BI = Binder Index (Fator Aglomerante)

CP, CV e SA = Consumos de Cimento Portland, Cinza Volante e Silica Ativa, respectivamente (em kg/m³)

RC = Resistência do concreto à compressão (em MPa)

3.4.3 Tratamento estatístico dos resultados no estado endurecido

Para tratamento estatístico dos resultados dos concretos no estado endurecido (resistência mecânica e absorção), os valores individuais obtidos para cada corpo-de-prova foram analisados a fim de excluir aqueles que mais se afastavam da média aritmética da amostragem. Para cada conjunto de resultados foi definido um intervalo de confiança que varia do limite inferior ao limite superior, ambos estabelecidos a partir da média, do desvio padrão e de um coeficiente atribuído conforme o nível de confiança da amostragem. O cálculo dos limites é demonstrado na Equação 7 a seguir.

$$IC = \bar{X} \pm z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

IC: Intervalo de confiança;

\bar{X} : Média aritmética;

z: Coeficiente de confiança = 1,96 (para o nível de confiança de 95%);

σ : Desvio padrão;

n: Número de resultados da amostra.

Para o cálculo dos limites de confiança, adotou-se nível de confiança de 95% ($z = 1,96$). Seguindo esse critério, os valores individuais foram analisados e aqueles que não estavam inseridos no intervalo de confiança foram excluídos do cálculo da média, mantendo sempre o mínimo de dois valores.

No Apêndice C deste trabalho são apresentados os valores individuais dos corpos-de-prova obtidos em cada ensaio de resistência mecânica, assim como os parâmetros estatísticos calculados (média, desvio padrão, limite de confiança inferior e limite de confiança superior).

Após o tratamento estatístico, os resultados médios de cada concreto para cada propriedade ensaiada foram analisados pelos testes de variância ANOVA a fim de verificar se as variações para os diferentes grupos de ensaio (neste caso, os concretos) são estatisticamente significativas e pelo teste de Tukey para identificar quais grupos apresentam diferenças. Os resultados da análise estatística também estão apresentados no Apêndice C do trabalho.

3.4.4 Ensaios de microscopia (MEV e EDS)

Após os ensaios mecânicos, os concretos foram ensaiados pelas técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por Energia Dispersiva (EDS) para análise de imagens microscópicas e análise elementar (química) das amostras.

No ensaio buscou-se investigar principalmente a região da ZT dos concretos com o objetivo de analisar diferenças de densidade da interface entre os agregados e a matriz de cimento e relacioná-las a cada composição de CAA. O modelo do microscópio usado no ensaio é um TESCAN Vega 3.

– Preparo das amostras

As amostras ensaiadas foram coletadas após o rompimento dos corpos-de-prova nos ensaios mecânicos realizados com 90 dias. Para permitir a visualização da ZT do concreto foram coletados fragmentos compostos por uma partícula de agregado graúdo revestida de argamassa. Esses fragmentos foram imersos em solução de álcool isopropílico durante 24 horas para paralisar as reações químicas da amostra a fim de conservar a idade de 90 dias do concreto na realização do ensaio. Após esse período, os fragmentos foram retirados do álcool e colocados em estufa à temperatura de 40°C durante 12 horas para secagem da água e do álcool que ficam retidos dentro dos poros permeáveis. Essa temperatura é seguida para que não haja deterioração da estrutura da amostra.

Imediatamente antes do ensaio de MEV, os fragmentos de cada concreto tiveram uma das superfícies levemente lixada a fim de regularizar a base de contato com o suporte metálico (*stub*). Em complemento ao ensaio de MEV, em algumas regiões das amostras foram realizadas análises elementares e caracterização química pela técnica de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS). Para não haver interferência nessa análise, as amostras não foram metalizadas. As amostras de concreto que foram ensaiadas pela técnica de MEV e EDS são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 – Amostras preparadas para o ensaio de MEV. (a) CAA-1. (b) CAA-2. (c) CAA-3



Fonte: O autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição dos concretos

4.1.1 Proporcionamento resultante do modelo de Alfred

A dosagem dos concretos foi definida avaliando-se quais combinações entre materiais componentes mais se aproximaria da curva ideal recomendada pelo modelo de Alfred, conforme explicado previamente no item 3.2. Cada conjunto de materiais testados com esse objetivo, por meio do código computacional desenvolvido, se refere à uma composição de CAA. No total, foram três combinações avaliadas, conforme estabelecido previamente (Tabela 8). Dado que o intervalo de granulometria das partículas é o mesmo para os três conjuntos, com dimensão máxima de 25,0 mm e dimensão mínima de 0,3 μm , a curva resultante do modelo de Alfred permanece constante para avaliação dos três conjuntos.

Diante disso, para cada conjunto o código retornou uma combinação de proporções de materiais (em volume) que melhor se ajusta a distribuição ideal recomendada pelo modelo de Alfred. Esse ajuste é quantificado pela soma dos resíduos de cada diâmetro de partículas (ΣRSS), calculado na etapa (3) de execução do código (ver 3.2.1). As proporções retornadas pelo código para cada conjunto testado são apresentadas na Tabela 18.

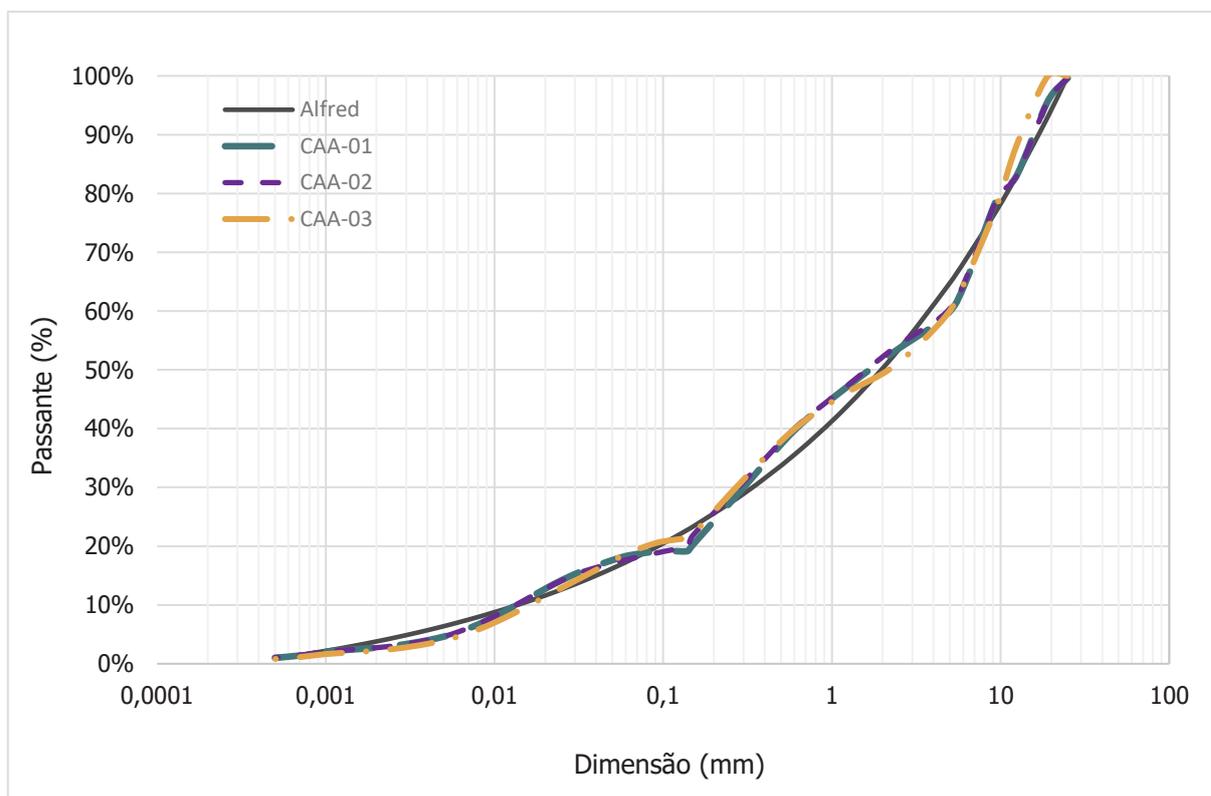
Tabela 18 – Proporções dos materiais retornadas pelo código para cada composição de concreto

Material	CAA-1	CAA-2	CAA-3
Cimento	0,132	0,128	0,096
Sílica Ativa	*	*	*
Cinza Volante	0,000	0,059	0,046
Areia Natural	0,195	0,350	0,000
Areia RCD	0,201	0,000	0,391
Brita #0 RCD	0,235	0,225	0,000
Brita #1 RCD	0,238	0,238	0,000
Brita #0 Natural	0,000	0,000	0,212
Brita #1 Natural	0,000	0,000	0,256
Soma	1,000	1,000	1,000
ΣRSS	0,0135	0,0118	0,0195

* A proporção de SA foi de 10% em relação à massa de cimento para os três traços.

As curvas de dosagem referentes à cada traço de concreto, e a curva ideal resultante do modelo de Alfred são apresentadas na Figura 27. É possível constatar que as curvas têm excelente aproximação.

Figura 27 – Curvas de dosagem resultantes do modelo de Alfred



Fonte: O autor (2022)

Na Tabela 19 são apresentadas as proporções ideais referentes à curva teórica de Alfred, as proporções retornadas pelo código para cada composição de CAA e os respectivos resíduos calculados para cada diâmetro de partículas.

Tabela 19 – Proporções resultantes da aplicação do modelo de Alfred

Diâmetro (mm)	Distribuição teórica	Distribuição real (experimental)			Resíduo (RSS)		
		CAA-01	CAA-02	CAA-03	CAA-01	CAA-02	CAA-03
25,000	100,00%	99,65%	99,65%	100,00%	0,00001	0,00001	0,00000
19,000	92,95%	95,61%	95,60%	99,92%	0,00071	0,00070	0,00485
12,500	83,09%	83,11%	83,06%	88,32%	0,00000	0,00000	0,00273
9,5000	77,17%	79,00%	78,96%	77,91%	0,00033	0,00032	0,00006
6,3000	69,03%	65,38%	65,83%	65,76%	0,00133	0,00102	0,00107
4,7500	63,90%	59,23%	59,75%	59,20%	0,00218	0,00172	0,00221
2,3600	52,64%	53,14%	53,80%	50,73%	0,00002	0,00013	0,00037
1,1800	43,27%	46,69%	46,85%	45,84%	0,00117	0,00128	0,00066
0,6000	35,57%	39,71%	40,01%	39,94%	0,00172	0,00197	0,00191
0,3000	28,91%	29,97%	30,95%	31,36%	0,00011	0,00041	0,00060
0,1500	23,32%	20,23%	21,82%	22,02%	0,00095	0,00022	0,00017
0,1400	22,81%	19,18%	19,84%	21,39%	0,00132	0,00089	0,00020
0,1100	21,24%	19,18%	19,35%	21,02%	0,00042	0,00035	0,00000
0,0900	19,77%	19,10%	18,80%	20,52%	0,00005	0,00009	0,00006
0,0630	17,55%	18,44%	17,81%	18,97%	0,00008	0,00001	0,00020
0,0560	16,86%	18,06%	17,46%	18,24%	0,00014	0,00004	0,00019
0,0450	15,63%	17,19%	16,77%	16,75%	0,00024	0,00013	0,00012
0,0360	14,44%	16,20%	15,97%	15,27%	0,00031	0,00023	0,00007
0,0320	13,84%	15,61%	15,45%	14,50%	0,00031	0,00026	0,00004
0,0250	12,64%	14,20%	14,15%	12,89%	0,00024	0,00023	0,00001
0,0200	11,62%	12,75%	12,75%	11,40%	0,00013	0,00013	0,00000
0,0150	10,38%	10,74%	10,79%	9,48%	0,00001	0,00002	0,00008
0,0120	9,47%	9,20%	9,28%	8,06%	0,00001	0,00000	0,00020
0,0100	8,77%	8,00%	8,09%	6,99%	0,00006	0,00005	0,00032
0,0080	7,96%	6,68%	6,76%	5,81%	0,00016	0,00014	0,00046
0,0060	6,97%	5,28%	5,34%	4,57%	0,00029	0,00027	0,00058
0,0050	6,38%	4,61%	4,65%	3,96%	0,00031	0,00030	0,00059
0,0040	5,70%	3,98%	4,00%	3,38%	0,00029	0,00029	0,00054
0,0032	5,05%	3,48%	3,49%	2,92%	0,00025	0,00024	0,00045
0,0026	4,48%	3,09%	3,09%	2,56%	0,00019	0,00019	0,00037
0,0020	3,80%	2,74%	2,73%	2,22%	0,00011	0,00011	0,00025
0,0014	2,94%	2,40%	2,40%	1,92%	0,00003	0,00003	0,00010
0,0010	2,20%	2,06%	2,09%	1,65%	0,00000	0,00000	0,00003
0,0007	1,48%	1,40%	1,43%	1,13%	0,00000	0,00000	0,00001
0,0005	0,85%	1,01%	1,05%	0,82%	0,00000	0,00000	0,00000
0,0003	0,00%	0,45%	0,47%	0,37%	0,00002	0,00002	0,00001
ΣRSS					0,01352	0,01182	0,01950

Fonte: O autor (2022)

4.1.2 Consumos de materiais para a produção dos concretos

Após a obtenção das proporções de materiais em volume, os valores foram convertidos em massa para o cálculo dos consumos de cada traço, em kg/m³. Tendo os consumos de materiais calculados para cada traço, procedeu-se a mistura. Conforme mencionado anteriormente, a dosagem das três misturas iniciou com relação a/c de 0,40, teor de 4,5% de SP em relação à massa de cimento e quantidade extra de água em função de 80% da taxa de absorção dos ARCI.

Para cada traço, gradualmente foram feitos acréscimos de água e de aditivo até obter uma mistura com características de auto adensabilidade. A composição final de cada traço é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Composições finais dos concretos

Material	CAA-01	CAA-02	CAA-03
Cimento (kg/m ³)	309	306	236
Silica Ativa (kg/m ³)	34	34	26
Cinza Volante (kg/m ³)	0	103	81
Areia Natural (kg/m ³)	419	768	0
Areia de RCD (kg/m ³)	426	0	873
Brita #0 de RCD (kg/m ³)	462	453	0
Brita #1 de RCD (kg/m ³)	459	470	0
Brita #0 Natural (kg/m ³)	0	0	483
Brita #1 Natural (kg/m ³)	0	0	592
Água efetiva (kg/m ³)	182	170	183
Água extra (kg/m ³)	86	44	85
SP (% / massa de agl.)	5,0	3,8	4,8
a/agl	0,53	0,38	0,53
a/finos	0,31	0,32	0,31

Fonte: O autor (2022)

A partir dos consumos finais adotados para cada concreto, alguns parâmetros de dosagem foram analisados a fim de verificar se as composições atendem as recomendações de Okamura e Ouchi (2003) e do EFNARC (2005) para dosagem de concretos auto adensáveis. Na tabela 21 são apresentados os parâmetros analisados.

Tabela 21 – Parâmetros de dosagem analisados nas composições de concreto

Parâmetro	CAA-01	CAA-02	CAA-03	Recomendações de dosagem
Consumo de cimento (kg/m ³)	309,2	306,0	236,0	-
Consumo de aglomerantes (kg/m ³)	343,5	443,4	343,6	-
Consumo de finos (kg/m ³)	583,0	536,4	599,1	380-600 kg/m ³ (EFNARC, 2005)
Massa de CV / Massa de cimento (%)	0,0%	33,8%	34,5%	-
Massa de SA / Massa de cimento (%)	10,0%	10,0%	10,0%	-
Vol. de agregado graúdo / Vol. total de sólidos	46,9%	46,1%	46,5%	< 50% do volume de sólidos (Okamura e Ouchi, 2003)
Agregado graúdo (kg/m ³)	920,6	923,6	1075,0	750-1000 kg/m ³ (EFNARC, 2005)
Massa de agregado miúdo / Massa total de agregados	47,9%	45,4%	44,8%	48-55% (EFNARC, 2005)
Consumo de água (litros/m ³)	182,1	170,0	183,5	150-210 litros/m ³ (EFNARC, 2005)
Vol. de pasta (litros/m ³)	382,8	371,2	409,8	300-380 litros/m ³ (EFNARC, 2005)
Vol. de pasta no concreto (%)	38,3%	37,1%	41,0%	≈ 40% (Okamura e Ouchi, 2003)
Vol. de argamassa no concreto (%)	66,2%	66,7%	65,0%	≈ 70% (Okamura e Ouchi, 2003)

NOTAS:

Consumo de aglomerantes se refere à soma dos consumos de cimento, sílica ativa e cinza volante, em kg/m³ de concreto.

Consumo de finos se refere ao consumo total de materiais com partículas inferiores a 0,075 mm (cimento, sílica ativa, cinza volante e material pulverulento contido nos agregados reciclados), em kg/m³ de concreto.

Volume de pasta inclui a soma de volume dos materiais aglomerantes (cimento, sílica ativa e cinza volante), do material pulverulento contido nos agregados reciclados e da água.

Fonte: O autor (2022)

A primeira observação é a respeito da proporção de cinza volante para o CAA-02 e para o CAA-03. Nota-se que a massa de cinza volante em relação à massa de cimento é em torno de 30% conforme a proporção em volume retornada pelo código. A partir de um levantamento bibliográfico constatou-se que essa faixa de proporção é a mais adotada por outros pesquisadores.

Observa-se que a proporção entre a massa de agregado miúdo e a massa total de agregados dos três concretos varia na ordem de 45% a 48%, sendo compatível com outras composições de CAA citadas na literatura, que usualmente adotam uma taxa F/A de 0,40 a 0,55, conforme discutido anteriormente (ver 2.2.2).

Outra observação relevante é que os três traços apresentam consumo de finos alto, pouco inferior ao limite máximo sugerido pelo EFNARC (2005). O traço CAA-3 tem o maior

consumo de finos, o que é justificado pelo uso da areia reciclada, que apresenta 29,26% de material pulverulento em sua composição. Proporcionalmente o consumo desse agregado resulta em um total de 255 kg de finos por m³ de concreto. O mesmo é observado para o CAA-1, constituído com 100% de brita reciclada e 50,4% de areia reciclada em substituição à areia natural o que resulta em uma parcela de quase 218 kg de finos por m³ de concreto. Já o CAA-2 é composto por maior quantidade de aglomerantes, porém contém menor consumo de finos, o que se deve ao menor teor de pulverulento das britas recicladas (11,76% para a brita #0 e 8,44% para a brita #1, somando o total de 20,20%). Apesar de o consumo de finos e o consumo de água dos traços serem diferentes, a relação a/finos é equivalente para os três.

Quanto as recomendações do EFNARC (2005) e de (Okamura e Ouchi, 2003) observa-se que, de maneira geral, os consumos dos concretos produzidos na pesquisa atendem os limites sugeridos para dosagem de CAA. Analisando, então, os parâmetros que não foram cumpridos, algumas considerações pontuais podem ser feitas.

Por exemplo, nota-se que o consumo de agregado graúdo de todos os traços é relativamente alto, com destaque para o CAA-3 cujo consumo excedeu o limite recomendado, o que é justificado em razão de a massa específica das britas naturais ser maior do que a massa específica das britas recicladas.

Uma última análise que cabe ser feita é em relação ao volume de pasta do CAA-1 e do CAA-3. Os dois traços têm consumo de aglomerantes e consumo de água similares. Porém, enquanto a composição de agregados miúdos do CAA-1 é mista, com areia natural e areia reciclada, o CAA-3 é composto com 100% da areia de ARCI. Dessa forma, devido ao elevado teor de pulverulento contido na areia reciclada, a quantidade de finos do CAA-3 é ligeiramente maior, o que contribuiu para a formação de maior volume de pasta. Verifica-se também que o volume de pasta dos três traços é compatível com os valores de outras dosagens apresentadas na literatura (ver tabela 7).

4.2 Caracterização dos concretos no estado fresco

Os resultados de caracterização dos concretos no estado fresco são apresentados na Tabela 22 e verificados conforme os limites estabelecidos para concretos auto adensáveis, segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). Os valores destacados em vermelho são aqueles que não atendem os limites admitidos pela norma.

Tabela 22 – Resultados de caracterização dos concretos quanto a auto adensabilidade

Ensaio	Limites admissíveis (*)	Classe de CAA (*)	CAA-1	CAA-2	CAA-3
<i>Slump-flow</i> (mm)	550 – 650	SF1	525	583	555
T500 (seg)	≤ 2	VS1	17	15	11
	> 2	VS2			
Anel J (mm)	0 a 25	PJ1	35	33	50
	25 a 50	PJ2			
Funil V (seg)	< 9	VF1	8	45	7
	9 a 25	VF2			

(*) Limites admissíveis e classes de CAA segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

Fonte: O autor (2022)

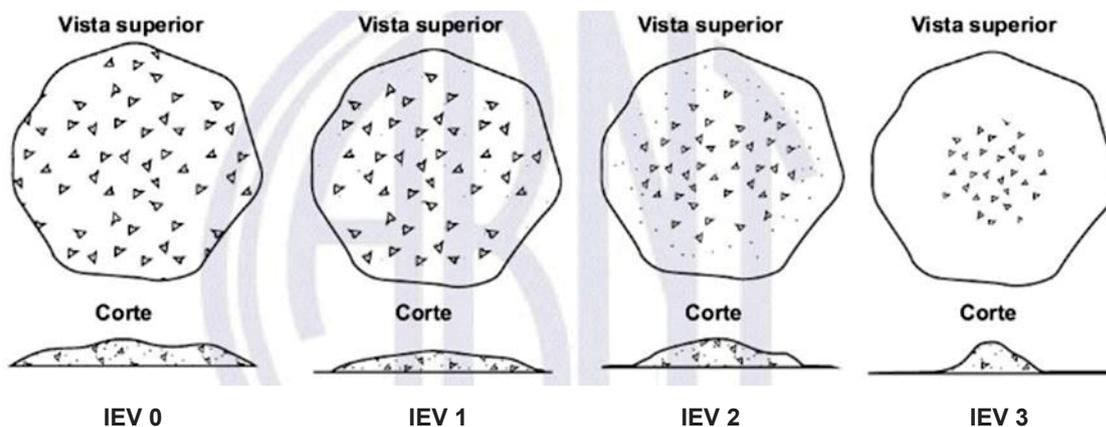
4.2.1 Coesão pelo Índice de Estabilidade Visual

Além da medida de *slump-flow* e do tempo T500, a NBR 15823-2 (ABNT, 2017b) também estabelece critérios para avaliar o índice de estabilidade visual (IEV) de concretos auto adensáveis, conforme os aspectos visuais identificados após o espalhamento do concreto na placa. O IEV é uma medida qualitativa da coesão e da segregação do concreto. Para avaliar esse resultado, a norma prevê quatro classes de IEV listadas a seguir e ilustradas na Figura 28.

- **IEV 0 (Altamente estável):** sem evidência de segregação ou exsudação;
- **IEV 1 (Estável):** Sem evidência de segregação e leve exsudação;
- **IEV 2 (Instável):** Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto;

- **IEV 3 (Altamente instável):** Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassas nas extremidades (aureóla de argamassa > 10 mm).

Figura 28 – Classes do índice de estabilidade visual (IEV)



Fonte: NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)

Logo abaixo são apresentadas imagens dos concretos registradas após o ensaio de *slump-flow* (Figura 29), nas quais é possível visualizar o índice de estabilidade visual (IEV) de cada concreto.

Figura 29 – Aspecto visual dos concretos após ensaio de *slump-flow*.



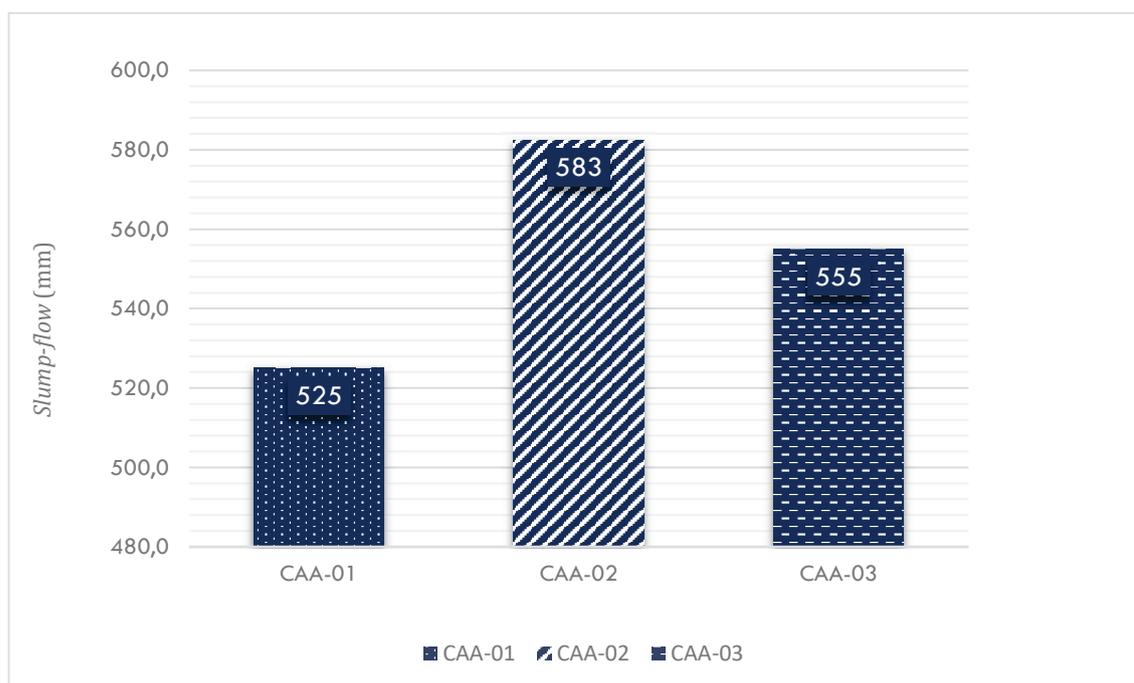
Fonte: O autor (2022)

A partir das imagens, identifica-se que os três concretos apresentam boa coesão. O agregado graúdo e a argamassa encontram-se bem distribuídos em toda a área de espalhamento da mistura, não havendo nenhuma evidência de segregação ou exsudação. Conclui-se, portanto, que os três concretos podem ser classificados com IEV 0.

4.2.1 Fluidez (habilidade de preenchimento)

Sabendo disso e considerando que a relação a/finos dos três traços é praticamente igual, cabe, então, analisar os resultados em relação as diferenças dos concretos quanto às proporções dos materiais sólidos. No gráfico da Figura 30 são apresentados os resultados de *slump-flow* dos concretos.

Figura 30 – Resultados de *slump-flow* dos concretos em relação ao volume de pasta e ao consumo de finos



Fonte: O autor (2022)

Apesar de o CAA-2 ter o menor volume total de pasta e o menor consumo de SP, foi o traço que apresentou a maior medida de SF dentre os três traços. O uso exclusivo de areia natural como agregado miúdo do traço deve ser o principal fator que acarretou esse resultado. Conforme discutido anteriormente (ver 2.1.2), em areias naturais de rio os grãos têm maior esferecidade, ou seja, são mais arredondados, e possuem textura mais lisa. Essas características contribuem para o efeito de rolamento das partículas, aumentando a capacidade de fluir da mistura (HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017; KASHANI *et al.*, 2014).

Já o CAA-1 obteve o menor resultado de SF, ficando, inclusive, abaixo do limite mínimo aceitável de acordo com a norma. Embora o teor de SP desse concreto tenha sido maior, a composição mista de agregado miúdo, com 49,6% de areia natural e 50,4% de areia reciclada, provavelmente é responsável pelo menor SF, principalmente em comparação com o

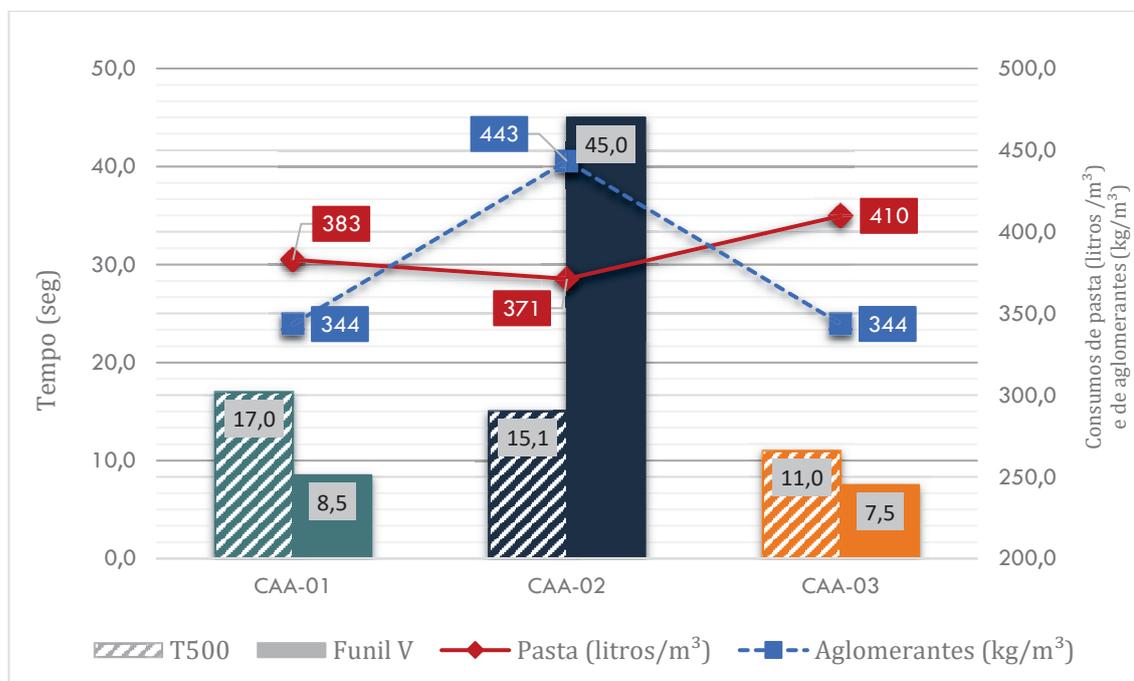
CAA-3, composto somente com areia natural. Esse fator somado ao maior consumo de cimento, que é o material com distribuição granulométrica mais fina, conforme curva apresentada na Figura 21, resultaram em uma maior área de superfície específica. Portanto, mesmo para uma relação água/finos praticamente igual, o CAA-1 obteve menor capacidade de fluir.

Outro fator que pode justificar o CAA-2 e o CAA-3 terem obtido maiores resultados do que o CAA-1 é o uso de cinza volante nos dois traços. Assim como a areia natural, a CV também é formada por partículas de formato esférico (ver 3.1.2), o que facilita o escoamento da mistura.

4.2.2 Viscosidade pelo tempo de escoamento

No que diz respeito aos tempos de escoamento medidos no ensaio de *slump-flow* (T500) e no ensaio de Funil V, na Figura 31 é apresentado um gráfico que relaciona os resultados obtidos nos dois ensaios com o volume de pasta e com o consumo de aglomerantes dos traços.

Figura 31 – Resultados de tempo de escoamento dos concretos em relação ao volume de pasta e ao consumo de aglomerantes



Fonte: O autor (2022)

O menor tempo de espalhamento de 500 mm (T500) foi medido para o CAA-3. Novamente, a dosagem com 100% de areia natural certamente facilitou o escoamento da mistura devido à maior esferecidade e textura lisa das partículas. Além disso, observa-se que esse concreto continha o maior volume de pasta dentre os três, o que também pode ter contribuído para o resultado.

Comparando o CAA-1 e o CAA-3, que têm praticamente o mesmo consumo de aglomerantes, nota-se que ambos obtiveram resultados bem próximos no ensaio de Funil V, porém o T500 do CAA-1 foi superior, indicando maior viscosidade dessa mistura. As diferenças das características das areias usadas nos dois traços certamente influenciaram esse resultado. Além disso, é válido notar que o CAA-1 contém maior consumo de materiais de granulometria mais fina (CP V e pulverulentos das britas de RCD), conforme apresentado nas curvas granulométricas (Figura 21), o que gera uma mistura mais viscosa.

O resultado que mais se destaca é o tempo de escoamento do CAA-2 medido no ensaio de Funil V, que foi bastante longo e não atendeu ao limite máximo admitido por norma para caracterizar o concreto como autoadensável quanto à habilidade passante. Uma vez que a dimensão máxima característica dos agregados graúdos usados na mistura é a mesma para os três concretos, descarta-se a possibilidade de alguma partícula de brita muito grande ter implicado no travamento da mistura na saída do funil. Verifica-se também que a proporção (em volume) e o consumo (em massa) de agregados graúdos do traço do CAA-2 estava dentro dos limites recomendados. Infere-se, então, que o tempo prolongado pode estar relacionado ao menor teor de SP da mistura e ao maior consumo de aglomerantes.

4.2.3 Habilidade passante pelo ensaio de Anel J

A habilidade passante dos concretos foi caracterizada pelo ensaio de anel J. O resultado é calculado a partir da diferença entre o diâmetro médio de espalhamento medido no ensaio de *slump-flow* e o diâmetro médio de espalhamento medido no ensaio de anel J, conforme demonstrado na Equações 8 e 9 a seguir.

$$PJ = SF - J_F \quad (\text{Eq. 8}) \quad \text{onde:}$$

$$J_F = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (\text{Eq. 9})$$

SF = média aritmética dos dois valores de diâmetro de espalhamento obtidos no ensaio de slump-flow (em mm)

PJ = diferença entre o diâmetro médio de espalhamento obtido com e sem a utilização do anel J (em mm)

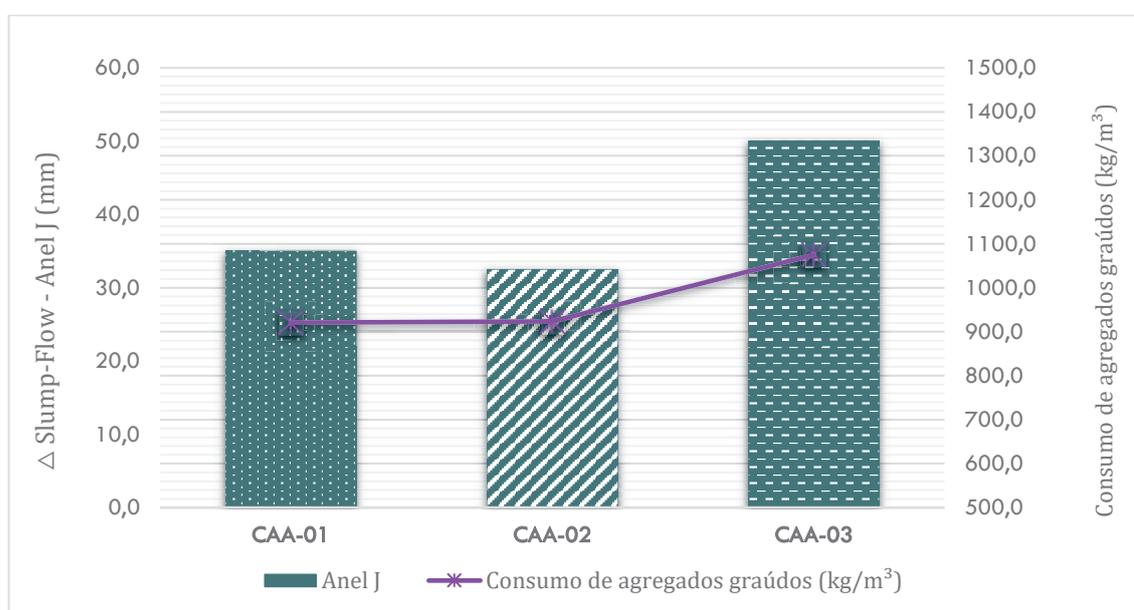
J_F = média aritmética dos dois valores de diâmetro de espalhamento obtidos no ensaio com o anel J (em mm)

J_1 = maior diâmetro obtido no ensaio com o anel J (em mm)

J_2 = menor diâmetro obtido no ensaio com o anel J (em mm)

Analisando os valores, é possível notar que os resultados de cada concreto estão intimamente relacionados aos respectivos consumos de agregados graúdos, conforme demonstra o gráfico apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Resultados dos concretos no ensaio de Anel J em relação ao consumo de agregados graúdos



Fonte: O autor (2022)

Verifica-se que o CAA-1 e o CAA-2, que continham consumos similares de agregado graúdo, apresentaram resultados semelhantes no ensaio do anel J. Em contrapartida, o CAA-3, composto com maior quantidade de agregado graúdo, obteve resultado mais alto. As imagens de cada CAA após a realização do ensaio de anel J são apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Comportamento dos concretos no ensaio de Anel J.



Fonte: O autor (2022)

De maneira geral, verifica-se que os três concretos apresentaram bom desempenho quanto à habilidade passante, não tendo sido identificados sinais de bloqueio das partículas de agregado nas barras de aço do anel J.

4.3 Massa específica e índice de vazios dos concretos

Os resultados de massa específica e de índice de vazios dos concretos são apresentados na Tabela 23.

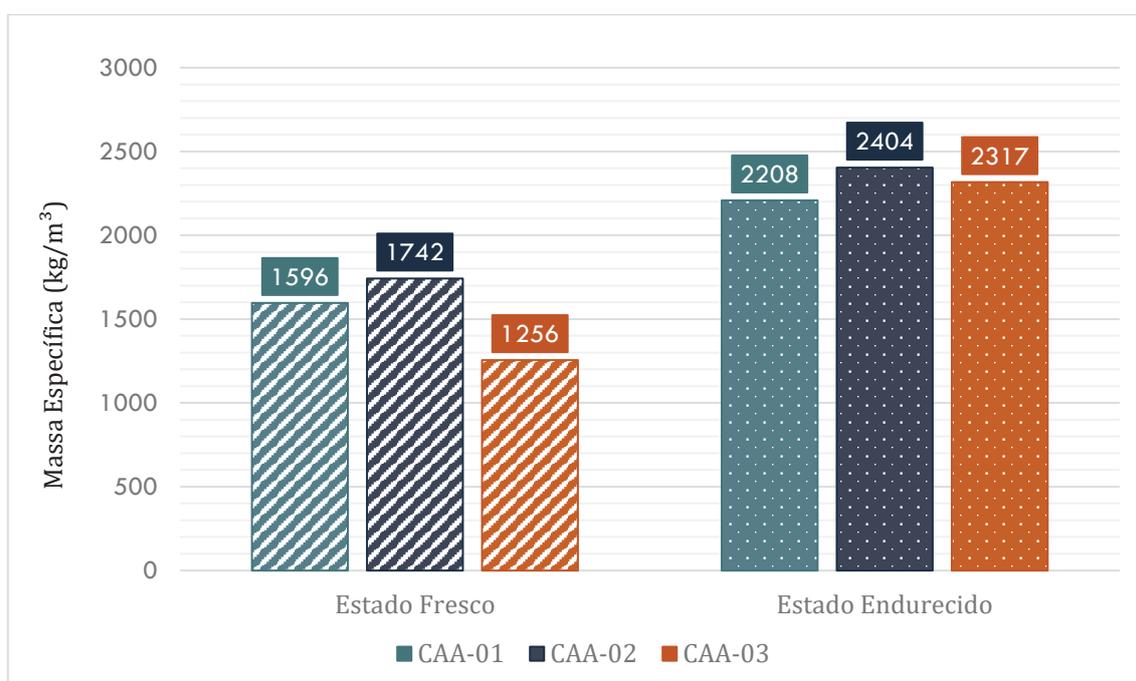
Tabela 23 – Resultados de massa específica e de índice de vazios dos concretos

Propriedade	CAA-1	CAA-2	CAA-3
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	1596,3	1742,1	1255,5
Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	2208,0	2403,7	2317,4
Índice de Vazios (%)	18,9%	10,9%	17,4%

Fonte: O autor (2022)

O gráfico da Figura 34 demonstra uma comparação entre os dois resultados de massa específica obtidos no estado fresco, pelo método gravimétrico, e no estado endurecido pelo método de pesagem hidrostática.

Figura 34 – Resultados de massa específica do concreto



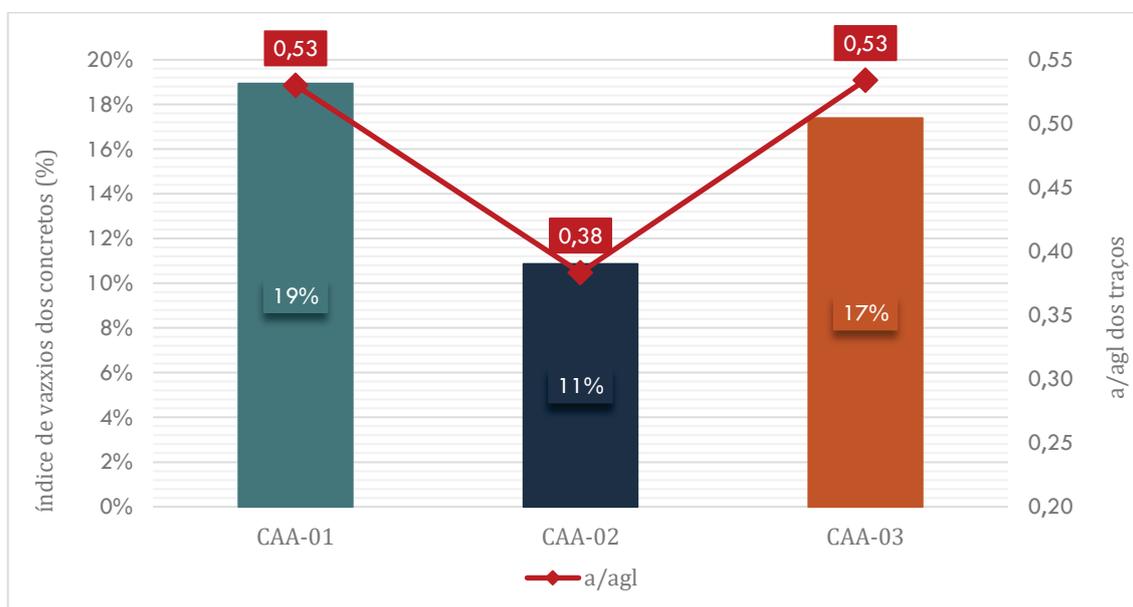
Fonte: O autor (2022)

Dentre os três concretos o CAA-2 obteve a maior massa específica, o que pode ser atribuído principalmente ao maior consumo de aglomerantes do traço. O CAA-1 apresentou a menor massa específica no estado endurecido, o que é esperado por ser um traço composto com 100% de brita reciclada e cerca de 50% de areia reciclada, que são materiais de menor densidade, conforme apresentado na Tabela 10.

Sendo um concreto dosado com brita natural, que tem maior densidade do que a reciclada, a massa específica do CAA-3 no estado endurecido foi maior do que a do CAA-1. Apesar disso, comparado ao CAA-2, o resultado para o CAA-3 foi ligeiramente inferior (3,6% menor), o que pode estar relacionado ao menor consumo de cimento, que também é um material de elevada densidade, e a relação a/agl do traço.

Os resultados de índice de vazios seguem a ordem inversa observada para a massa específica no estado endurecido, sendo o CAA-2 o concreto com menor resultado e o CAA-1 com o maior. O principal fator que pode ter influenciado no índice de vazios dos concretos é a relação a/agl dos traços, conforme demonstrado no gráfico da Figura 35.

Figura 35 – Relação entre o índice de vazios e a relação a/agl dos concretos



Fonte: O autor (2022)

Observa-se que o CAA-2, que teve a menor relação a/agl dentre os três traços, obteve índice de vazios 43% inferior ao do CAA-1 e 38% inferior ao do CAA-3. Enquanto isso, o CAA-1 e o CAA-3, que tiveram a mesma relação a/agl, apresentaram pouca diferença quanto ao índice de vazios.

4.4 Resistência mecânica e módulo de elasticidade dos concretos

Os resultados médios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados de resistência mecânica e módulo de elasticidade dos concretos aos 28 e aos 90 dias

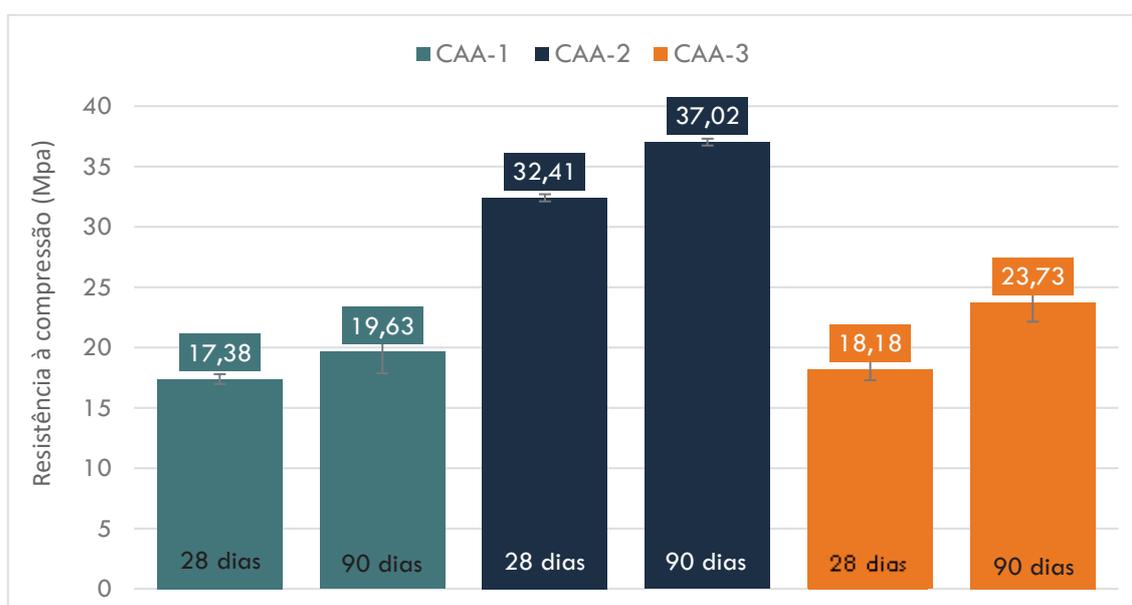
Propriedade	Idade (dias)	CAA-1	CAA-2	CAA-3
Compressão axial (MPa)	28	17,38	32,41	18,18
	90	19,63	37,02	23,73
Tração por compressão diametral (MPa)	90	2,16	4,33	2,59
Módulo de elasticidade estático (GPa)	28	15,52	30,15	17,78

Fonte: O autor (2022)

4.4.1 Resistência à compressão

Os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Figura 36. Esses resultados representam a média dos valores individuais de resistência dos corpos-de-prova (cps) de cada concreto, sendo quatro cps para a idade de 28 dias e cinco cps para a idade de 90 dias. Os resultados individuais de cada CP são apresentados no Apêndice C do trabalho.

Figura 36 – Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 28 e 90 dias

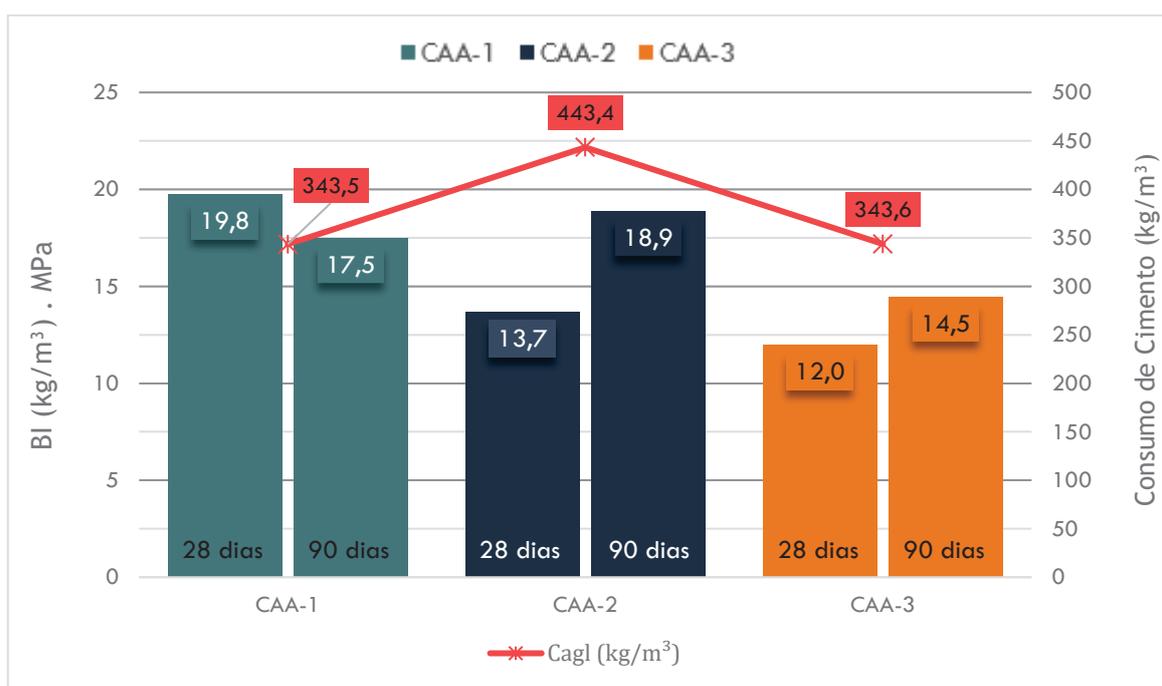


Fonte: O autor (2022)

Primeiramente, é válido destacar que a diminuição da resistência mecânica em concretos produzidos com agregados reciclados é esperada em decorrência da má qualidade da argamassa aderida aos ARC que sofreram o processo de britagem, o que, conseqüentemente, gera uma ZT menos resistente.

Na idade de 28 dias o CAA-2 foi o único concreto que atingiu resistência estrutural de 20 MPa. É evidente também que nas duas idades de ensaio o CAA-2 obteve resistência significativamente superior em comparação aos outros dois concretos. Na idade de 90 dias a resistência foi 89% maior em relação ao CAA-1 e 56% maior em relação ao CAA-3. Esse resultado era esperado em virtude do maior consumo total de aglomerantes e menor relação a/agl do traço. Na Figura 37 abaixo são apresentados o fator BI calculado para a resistência à compressão dos três traços de CAA e os respectivos consumos de aglomerante dos traços.

Figura 37 – Fator BI e consumo de aglomerantes dos concretos



Fonte: O autor (2022)

Avaliando o fator BI calculado para os três traços é notável que os concretos não alcançaram ecoeficiência tão satisfatória. O CAA-2 apresentou os menores fatores BI, de 13,7 e 12,0 kg/m³ .MPa, em relação às idades de 28 e 90 dias, respectivamente. Baseado nos dados de pesquisa bibliográfica encontrados para o indicador (ver 2.2.2.1), os menores fatores BI obtidos, de 12,0 e 13,7 são mais altos em comparação a outros resultados. Para CAA dosados com AN, o menor e maior valor encontrados na bibliografia, são de 6 e 12 kg/m³ .MPa,

respectivamente (MATOS, FOIATO E PRUDÊNCIO JR., 2019). Já tendo como referência o trabalho de Thomas, Setién e Polanco (2016), no qual foram produzidos CCV com ARC, os concretos apresentaram BI em torno de 8 kg/m³ .MPa Contudo, é natural que o fator BI obtidos no presente trabalho sejam mais altos uma vez que a combinação dos fatores de dosagem (dosagem com ARC e autoadensibilidade das misturas) era mais desfavorável para o bom desempenho mecânico dos concretos.

Um outro aspecto avaliado é que os concretos CAA-2 e CAA-3 apresentaram mais evolução de resistência da idade de 28 para 90 dias, com ganhos de 4,6 e 5,5 MPa, respectivamente. Esse resultado pode ser atribuído à maior quantidade de adição pozolânica dos traços (de reação química mais lenta), que foram dosados com cinza volante, diferentemente do CAA-1 que contém somente sílica ativa.

O CAA-1 obteve os menores valores de resistência nas duas idades. Sabe-se que a resistência mecânica do concreto depende da sua porosidade. Nesse sentido, a resistência mais baixa do CAA-1 certamente tem relação com o maior índice de vazios desse concreto. Ressalta-se que o traço CAA-01 foi dosado com 100% de AGR e 50,4% de AMR em substituição a areia natural, o que pode ter prejudicado o desenvolvimento de resistência mecânica do concreto. Nili *et. al.* (2019) obtiveram RC₂₈ de 31,8 MPa para um CAA dosado com proporção semelhante de agregados (100% de AGR e 50% de AMR). Deve-se, contudo, salientar que o consumo total de agl era de 418 kg/m³, superior ao consumo do CAA-1 (343 kg/m³), justificando, portanto, um valor de resistência maior.

Rajhans, Panda e Nayak (2018) também obtiveram um resultado próximo a RC₂₈ obtida para o CAA-2 usando uma dosagem semelhante. O CAA foi produzido com 100% de ARG, consumo de cimento de 300kg/m³, 160 kg de cinza volante e relação a/agl de 0,43 e obteve resistência à compressão de 34 MPa aos 28 dias de idade.

Em relação ao CAA-3, os resultados apresentados na literatura para concretos com dosagem similar, ou seja, com 100% de AGN e 100% de AMR, são superiores (ver Tabela 5). A exemplo, Corinaldesi e Moriconi (2011) obtiveram RC₂₈ em torno 29 MPa para um CAA dosado com 100% de AMR e consumo de cimento igual a 440 kg/m³. No estudo de Bahrami *et. al.* (2020) a resistência do CAA produzido com 100% de areia reciclada e consumo de cimento de 400 kg/m³ foi de 24,8 MPa. Cabe ressaltar que outros parâmetros da dosagem, como consumo de cimento e adições e relação a/agl, também devem ser levados em consideração para que essa comparação seja mais efetiva.

Analisando todos os resultados apresentados na literatura (Tabela 5), verifica-se que, de modo geral, a redução da resistência mecânica de CAAs dosados com agregados reciclados

é mais acentuada em composições com uso combinado de AMR e AGR ou em composições formuladas com 100% de AMR. Os estudos de Corinaldesi e Moriconi (2011), Gesoglu *et. al.* (2015), Nili *et. al.* (2019) e Bahrami *et. al.* (2020) são exemplos que demonstram esse padrão.

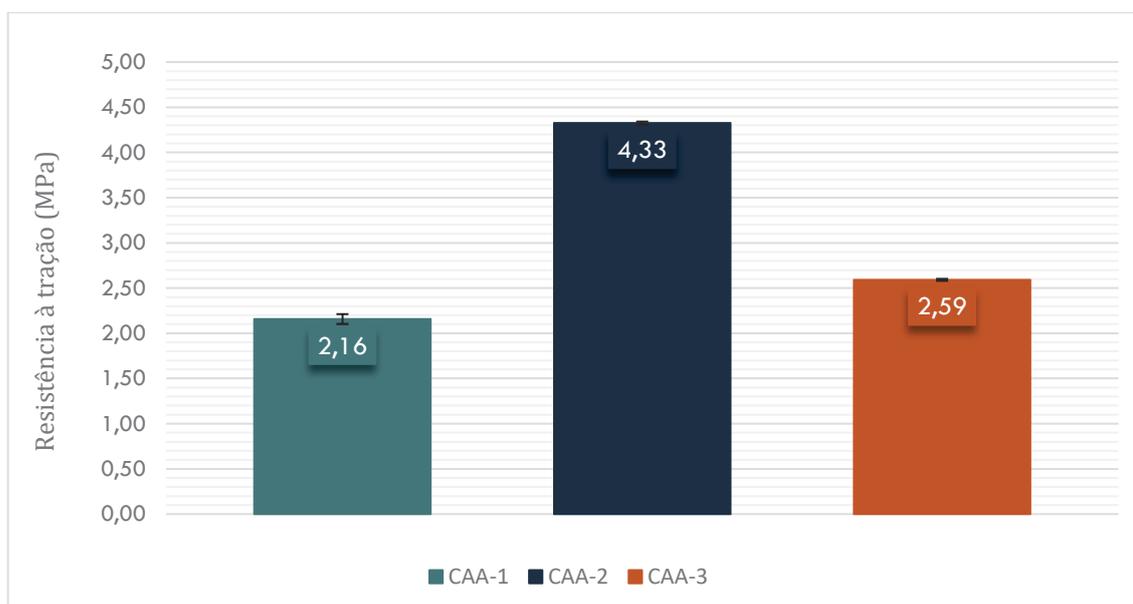
Ao comparar os resultados de RC a partir da análise de variância do ANOVA verifica-se que os valores diferem estatisticamente tanto em relação aos concretos quanto em relação as idades de ensaio, com confiabilidade de 95%. Com ressalva, o teste de Tukey demonstra que os únicos grupos que não diferem são os concretos CAA-1 e CAA-3 na idade de 28 dias, ou seja, estatisticamente a RC_{28} dos dois traços é considerada igual. Os resultados da análise estatística de variância são apresentados no Apêndice C.

Dois tipos de ruptura predominantes foram observados nos corpos-de-prova dos três concretos: a ruptura com formação de cones e a ruptura com formação de plano de cisalhamento a 45°, definidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018a) como C e como E, respectivamente. Esses tipos de ruptura indicam que a distribuição de carga aplicada no ensaio foi adequada, não havendo concentração de tensão devido a falhas de moldagem.

4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios de resistência à tração dos concretos na idade de 90 dias (f_{ct90}) são apresentados na Figura 38. A resistência média foi calculada a partir da média aritmética das resistências individuais de quatro cps, que estão apresentadas no Apêndice C do trabalho.

Figura 38 – Resultados de resistência à tração dos concretos aos 90 dias



Fonte: O autor (2022)

É notável que os resultados seguem o mesmo padrão do ensaio de resistência à compressão, sendo o CAA-2 o concreto que alcançou maior resistência, seguido do CAA-3 e por último o CAA-1. A análise de variância do método ANOVA demonstra que as medidas de resistência à tração dos concretos são estatisticamente diferentes, com confiabilidade de 95%. O teste de Tukey comprova que os concretos são estatisticamente diferentes quanto à resistência à tração. A análise variância realizada para os resultados de resistência à tração está apresentada no Apêndice C.

Observando a Tabela 5 (ver 2.1.3.3), verifica-se que a RT_{C-90} do CAA-1 (2,16 MPa) demonstra coerência com os resultados de outros estudos apresentados na literatura para CAAs com composição mista de AGR e 100% de AMR, que variam na faixa entre 2,5 e 3,1 MPa (KOU e POON, 2009; GESOGLU *et. al.*, 2015; NILI *et. al.*, 2019). Mesmo esses resultados sendo referentes à idade de 28 dias, não impedem uma comparação uma vez que a grandeza dos valores de resistência à tração do concreto costuma não ser expressiva.

Com relação ao CAA-2, o RT_{C-90} de 4,33 MPa se sobressai a maioria dos outros resultados encontrados na literatura, que variam entre 2,3 e 6,2 MPa (GRDIC *et. al.*; 2010; Gesoglu *et. al.*; 2015, Carro-López *et. al.*, 2015; RAJHANS; PANDA; NAYAK, 2018; NILI *et. al.*, 2019; BAHRAMI *et. al.*, 2020). Dentre os resultados avaliados, o que mais se aproxima da RT_{C-90} do CAA-2 é o obtido por Nili *et. al.* (2019), de 4,1 MPa.

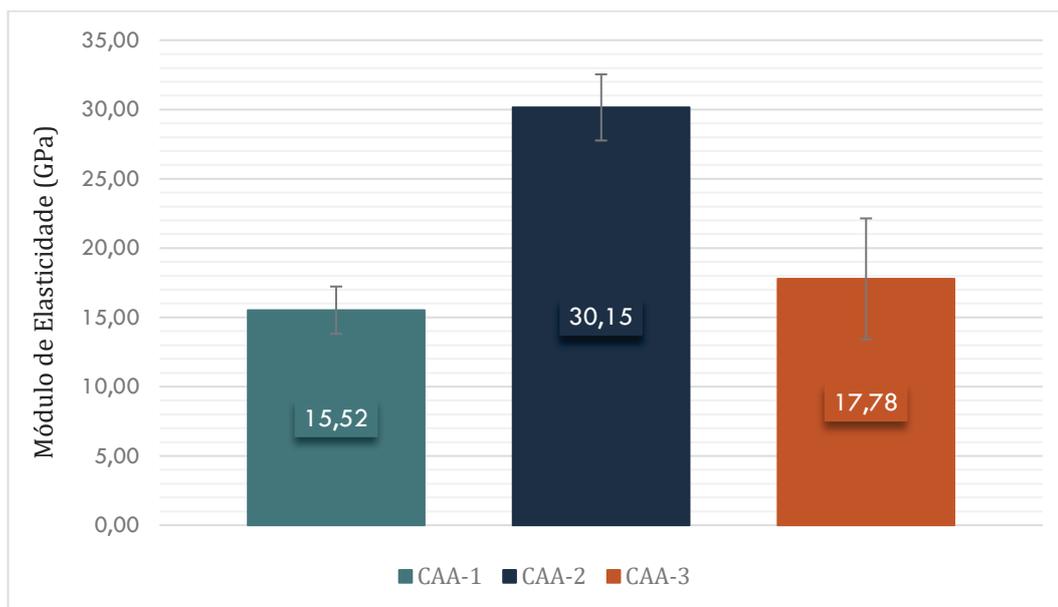
A RT_{C-90} do CAA-3 também está dentro da faixa dos valores apresentados na Tabela 5 para concretos produzidos com AGR e AMR, que variam entre 2,5 e 2,9 MPa na idade de 28 dias, também confirmando coerência com os resultados da literatura. Assim como observado para os dados de resistência à compressão, observa-se que, no geral, os concretos compostos com AMR e os de composição mista de agregado reciclado (AGR + AMR) apresentam menores valores de resistência à tração do que os concretos dosados com AGR e AMN.

Além disso, é de consenso técnico e científico de que a resistência à tração do concreto varia de 7 a 11% da resistência à compressão do mesmo material (MEHTA; MONTEIRO, 2008; ABNT NBR 6118, 2014). Os resultados obtidos para os concretos ensaiados são consistentes dentro dessa abordagem, indicando que os valores de resistência à tração correspondem a cerca de 10% das respectivas resistências à compressão.

4.4.3 Módulo de elasticidade estático

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estático são apresentados no gráfico da Figura 39.

Figura 39 – Resultados de módulo de elasticidade estático dos concretos aos 28 dias



Fonte: O autor (2022)

Novamente, o CAA-2 apresentou o maior resultado dentre os três concretos, sendo quase o dobro do módulo obtido para o CAA-1 e 70% superior ao módulo obtido para o CAA-3. A diferença entre o CAA-1 e o CAA-3 também foi menos expressiva, de cerca de 15%.

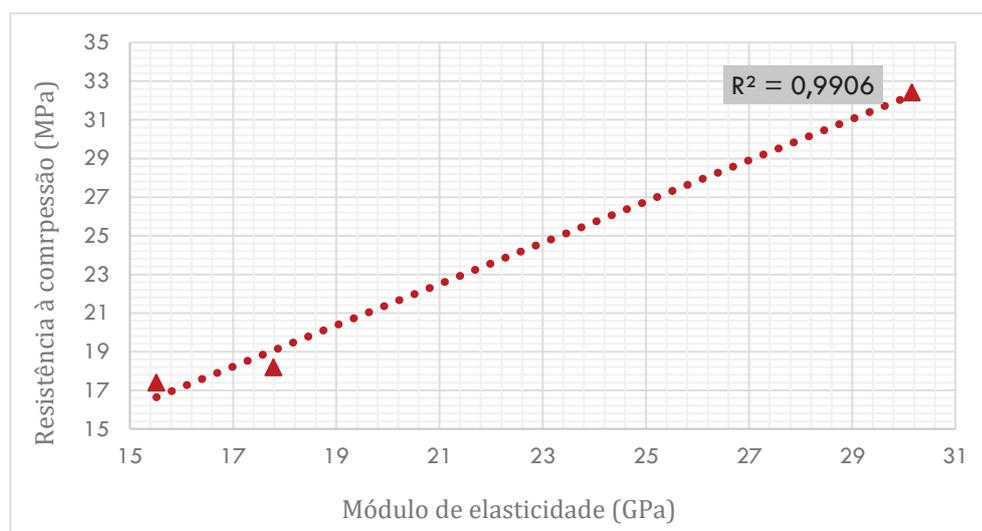
A análise de variância pelo método ANOVA indica que há diferença significativa entre os resultados de módulo de elasticidade. Contudo, a análise complementar pelo teste de Tukey demonstra que os concretos CAA-1 e CAA-3 são estatisticamente iguais, ou seja, a variação estatística apontada pelo teste ANOVA é resultante das comparações isoladas do CAA-1 com o CAA-2 e do CAA-3 com o CAA-2.

Comparando os valores apresentados com resultados encontrados na literatura, nota-se similaridade com outros estudos. O módulo de elasticidade do CAA-1 é coerente com o resultado de 16,9 GPa obtido por Gesoglu et. al. (2015) para um CAA dosado com 100% de AGR e AMR e consumo de cimento de 312 kg/m³.

Já repetindo a comparação feita na avaliação da resistência à compressão, observa-se que o módulo de elasticidade do CAA-2 é praticamente igual ao resultado de 30,7 GPA obtido por Rajhans, Panda e Nayak (2018) para um CAA de dosagem similar, mais uma vez demonstrando uma boa correlação entre os dois estudos. O módulo de elasticidade do CAA-3 também demonstrou coerência com o resultado de 18,9 GPA obtido por Gesoglu *et. al.* (2015) para um CAA dosado com 100% de AMR.

Além dessa comparação com os resultados encontrados na literatura, verifica-se também que o comportamento dos concretos quanto ao módulo de elasticidade segue o mesmo padrão do comportamento em relação à compressão. O gráfico apresentado na Figura 40 demonstra que há uma forte correlação entre os resultados obtidos aos 28 dias de idade dos concretos para essas duas propriedades, com coeficiente de correlação de 0,99.

Figura 40 – Correlação dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade

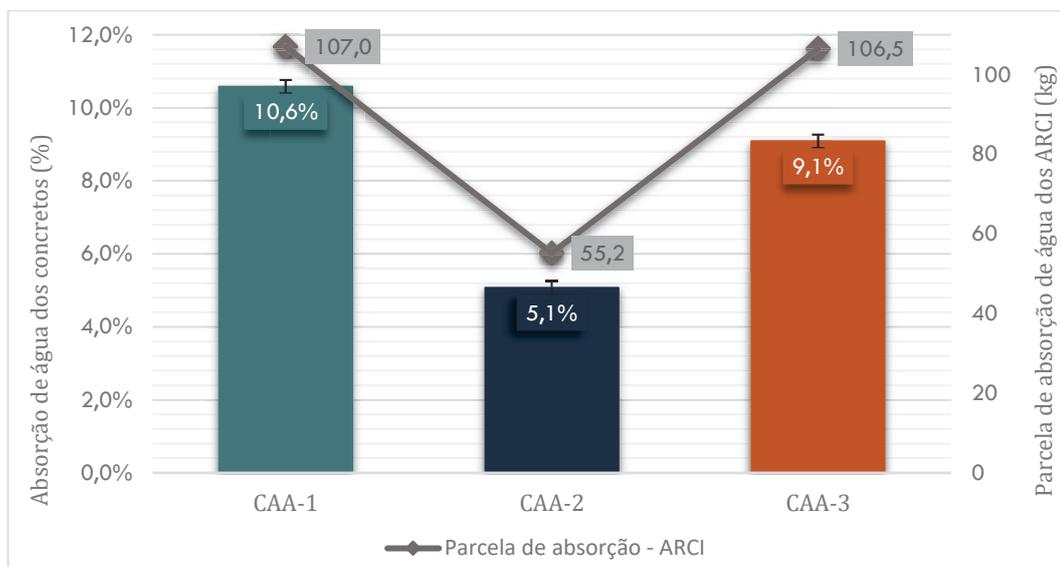


Fonte: O autor (2022)

4.5 Absorção por imersão

Os resultados de absorção de água dos concretos, determinados após período de 72 horas de imersão, estão apresentados no gráfico da Figura 41. Para complementar a análise dos resultados, no mesmo gráfico, para cada concreto, é apresentado um ponto que corresponde a capacidade total de absorção dos agregados reciclados usados na mistura, ou seja, a soma das taxas de absorção de cada ARCI multiplicadas pelos respectivos consumos. O dado é expresso em kg de água absorvida por m³ de concreto.

Figura 41 – Resultados de absorção por imersão dos concretos



Fonte: O autor (2022)

A análise de variância pelo método ANOVA confirmou que os resultados obtidos para os três concretos variam estatisticamente, com confiabilidade de 95%. Os resultados da análise são apresentados no Apêndice C do trabalho.

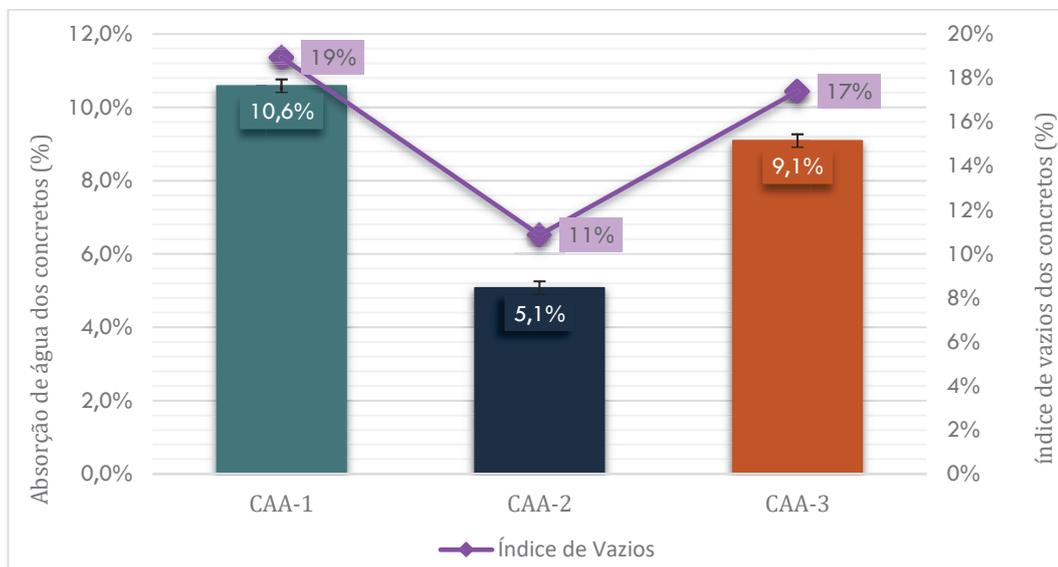
O concreto que apresentou menor absorção de água foi o CAA-2, com taxa 55% inferior ao CAA-1 e 43% inferior ao CAA-3. A investigação dos concretos quanto à absorção demonstra coerência com os resultados de resistência mecânica, na medida em que o CAA-1 foi o concreto que absorveu mais água e foi também o concreto menos resistente. Conforme discutido anteriormente, pode-se inferir que o desempenho inferior desse concreto está relacionado ao maior consumo de agregados reciclados do traço, o que é evidenciado em diversos estudos apresentados na literatura.

Observa-se que existe uma relação entre a taxa de absorção de água dos concretos e a capacidade total de absorção dos agregados reciclados incorporados na mistura. Apesar disso, a absorção dos agregados não parece ser um fator preponderante, o que é demonstrado comparando os resultados do CAA-1 com o CAA-3. Mesmo a absorção do CAA-1 sendo 26% maior do que a do CAA-3, a parcela de absorção resultante dos agregados reciclados é praticamente igual para os dois concretos.

O índice de vazio dos concretos parece ser um fator de maior influência na absorção. Conforme demonstrado no gráfico da Figura 42, os resultados de absorção variam na mesma ordem do índice de vazios determinado experimentalmente no estado endurecido. Deste

ponto de vista, é possível inferir que o comportamento dos concretos quanto à absorção de água foi influenciado principalmente pelas características de porosidade do material.

Figura 42 – Relação entre a absorção e o índice de vazios dos concretos no estado endurecido



Fonte: O autor (2022)

4.6 Absorção por capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade realizado nos concretos são apresentados na Tabela 25.

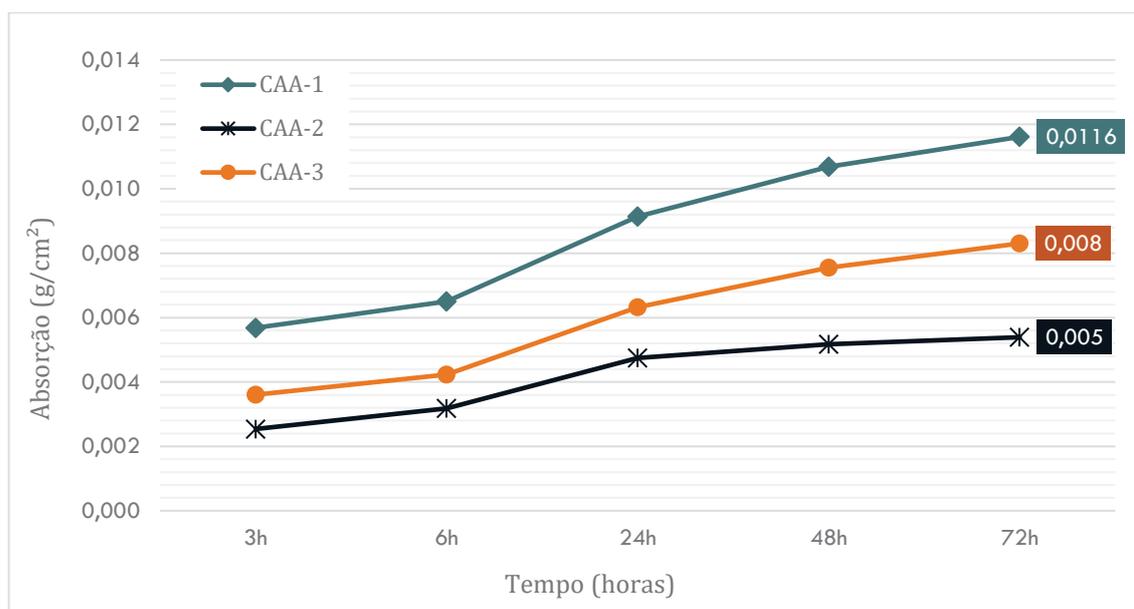
Tabela 25 – Resultados de absorção por capilaridade dos concretos

Capilaridade	CAA-1	CAA-2	CAA-3
3h (g/cm ²)	0,006	0,003	0,004
6h (g/cm ²)	0,007	0,003	0,004
24h (g/cm ²)	0,009	0,005	0,006
48h (g/cm ²)	0,0107	0,005	0,008
72h (g/cm ²)	0,0116	0,005	0,008
Ascensão capilar (cm)	2,30	15,55	2,15

Fonte: O autor (2022)

O gráfico da Figura 43 apresenta a evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos ensaiados.

Figura 43 – Evolução dos concretos no ensaio de absorção por capilaridade



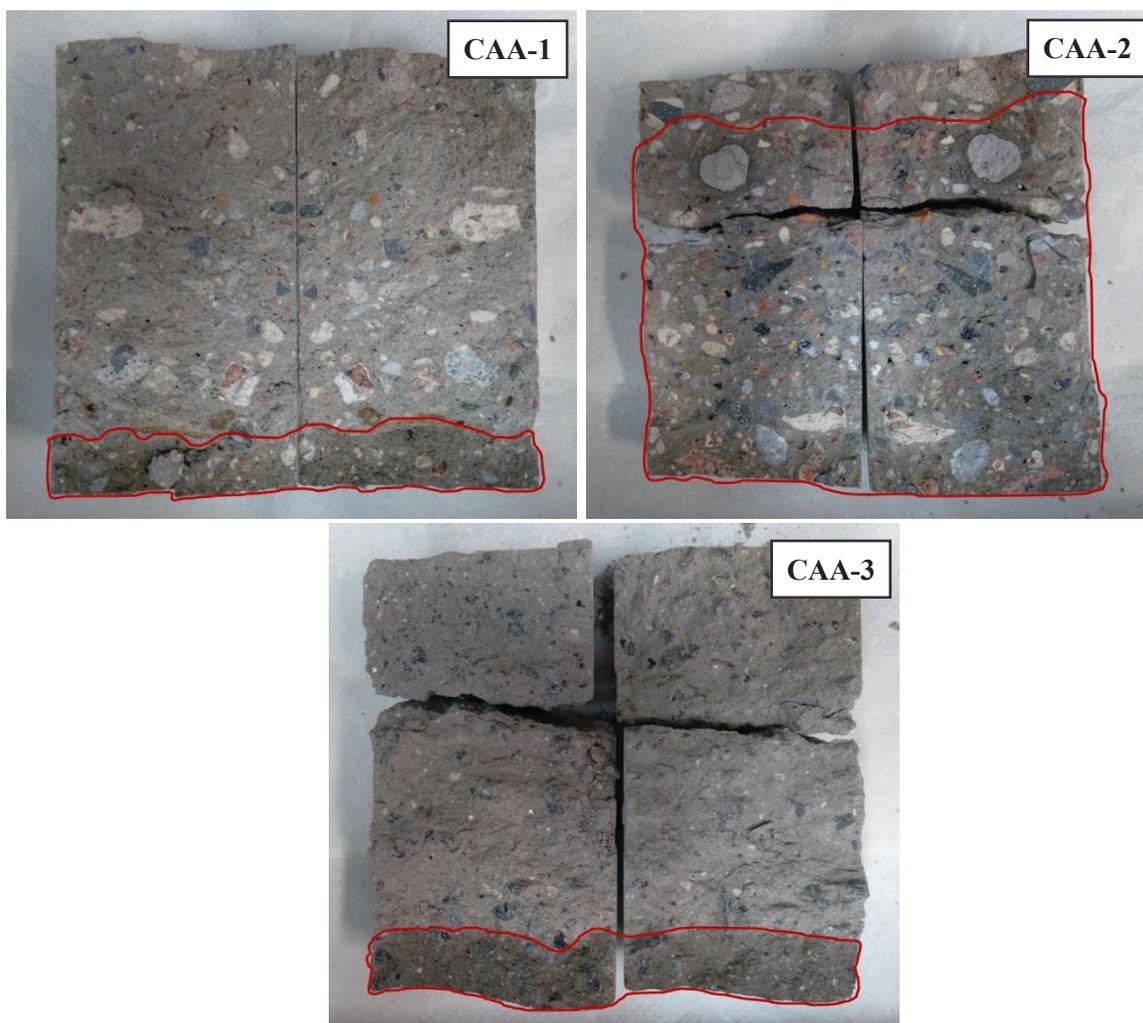
Fonte: O autor (2022)

Verifica-se que o comportamento dos concretos segue o mesmo padrão observado no ensaio de absorção por imersão. O CAA-2 teve menor taxa de absorção de água ao final do ensaio, 42% menor do que absorção do CAA-1, que apresentou a maior taxa de absorção ao longo do tempo, e 21% menor do que a absorção do CAA-3. A análise de variância dos resultados pelo método ANOVA demonstra que os concretos também têm comportamentos estatisticamente diferentes quanto à absorção por capilaridade.

É possível identificar que os três concretos apresentaram um aumento na taxa de absorção no intervalo de 6 a 48 horas, com destaque para o CAA-3, cujo quantidade de água absorvida nesse período correspondeu a cerca de 55% do total, enquanto para o CAA-1 foi de 50%. Além disso, observa-se que CAA-2 manteve um perfil de absorção mais constante a partir de 24 horas de ensaio.

As imagens dos cps registradas após a determinação da altura de ascensão capilar dos concretos é apresentada na Figura 44. Em relação à altura de ascensão capilar medida após a ruptura dos cps ao final do ensaio de absorção, observa-se que o CAA-1 e o CAA-3 obtiveram resultados praticamente iguais. Comparado a esses dois concretos, a ascensão medida nas amostras do CAA-2 foi cerca de seis vezes maior.

Figura 44 – Ascensão de água nos corpos-de-prova após ensaio de absorção por capilaridade



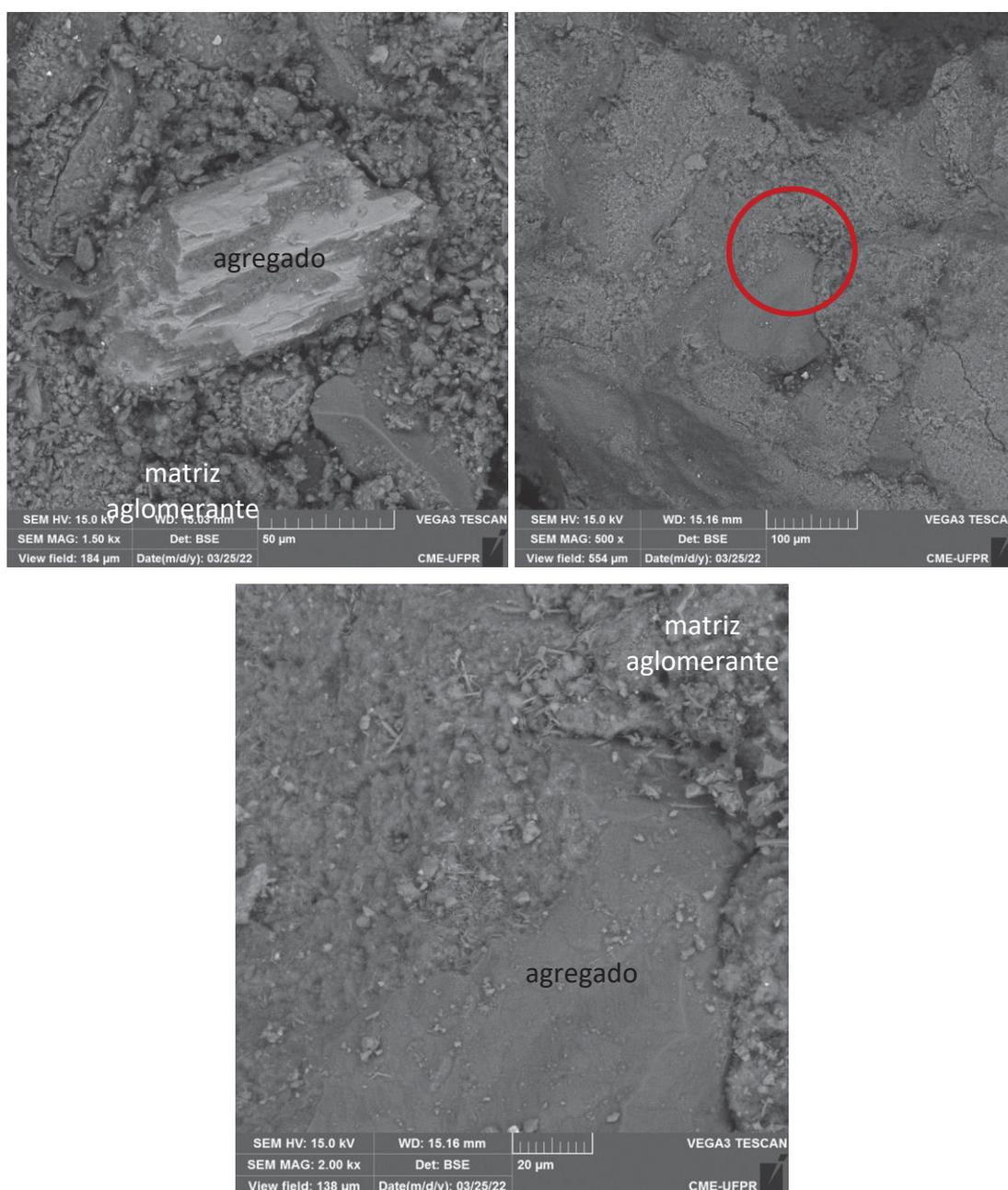
Fonte: O autor (2022)

Associando o perfil de absorção de água por capilaridade com os resultados de resistência mecânica, nota-se que o CAA-2 é o concreto mais resistente e que menos absorveu água, porém com maior ascensão capilar. Esse resultado é justificado pelo tamanho de poros do concreto. Tem-se que quanto menores são os poros do concreto, maior será a tensão capilar interna gerada sob a presença de água, e assim, a ascensão de água também será maior (BENTZ, AİTCIN, 2008).

4.7 Imagens de Microscopia (MEV) e Análise Elementar (EDS)

As imagens registradas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura e os gráficos gerados pela análise de EDS são apresentados nas Figuras 45 à 51. Nas imagens de MEV, as regiões de aspecto mais uniforme e liso evidenciam as partículas de agregado, enquanto as regiões mais rugosas revelam a matriz aglomerante, sendo possível identificar a ZT a partir da interface entre essas duas regiões. A Figura 45 apresenta as imagens de MEV do CAA-1.

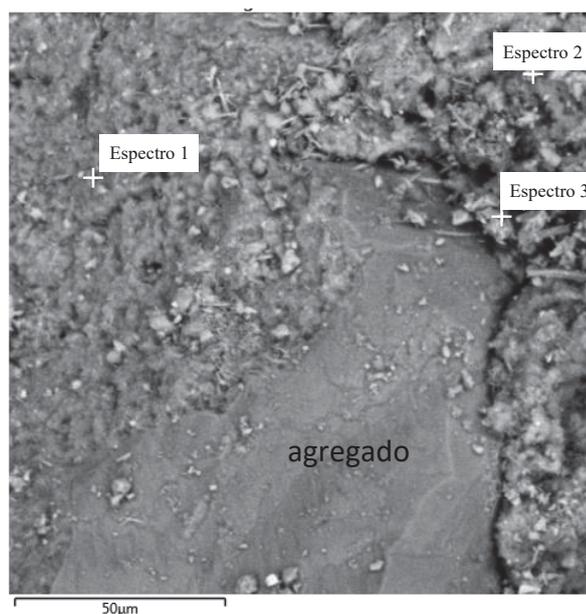
Figura 45 – Imagens de MEV do CAA-1



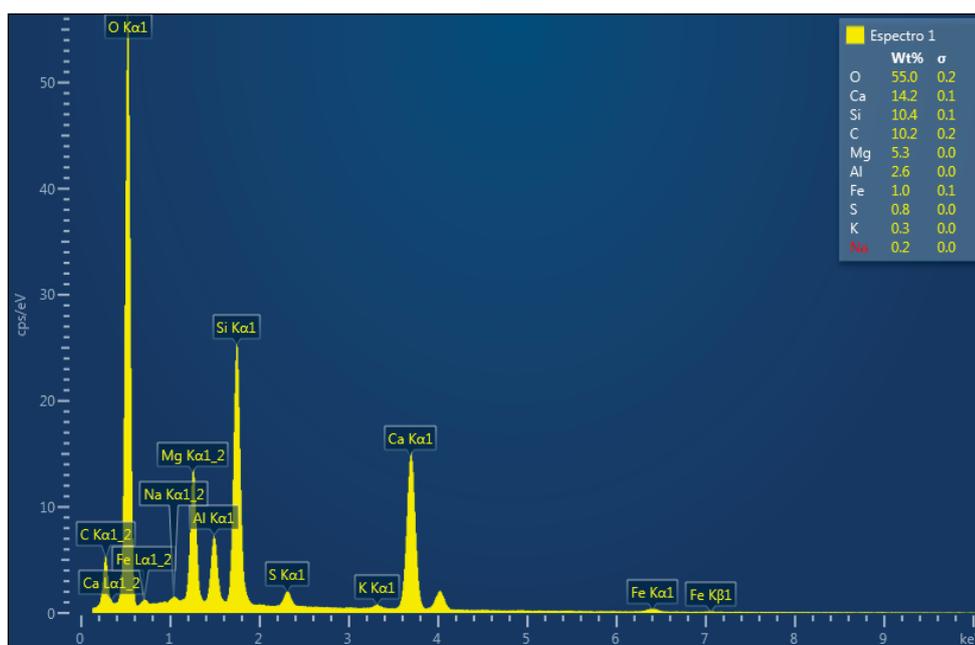
Fonte: O autor (2022)

Nas imagens de MEV do CAA-1 é possível visualizar nitidamente a ZT entre a partícula de agregado e a matriz de argamassa. Na imagem (b) e na ampliação do ponto demarcado, apresentado na imagem (c), também é possível identificar microfissuras na ZT. Os gráficos de EDS gerados nesse ponto da imagem são apresentados na Figura 46.

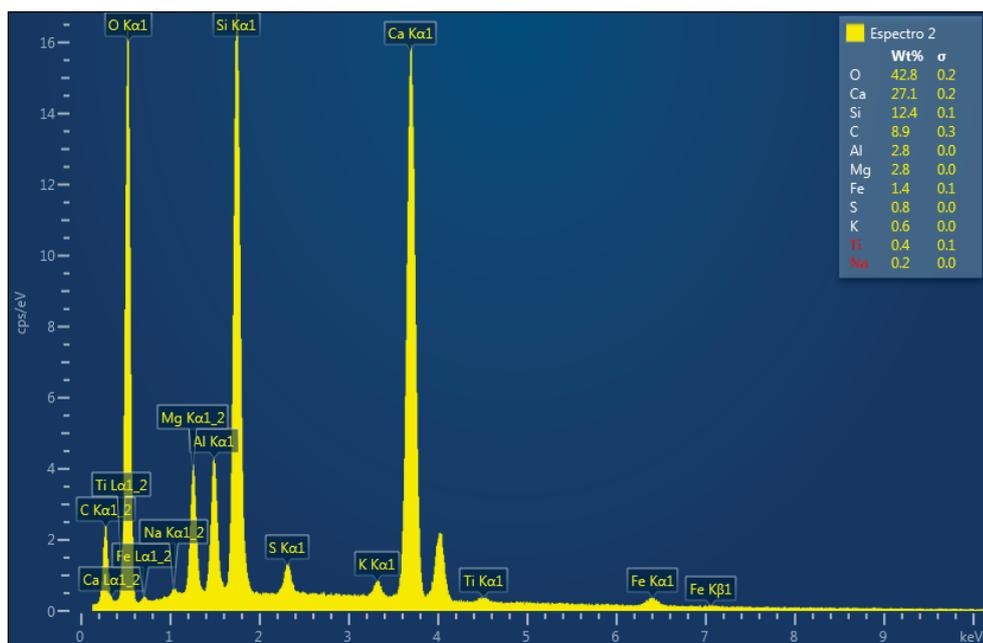
Figura 46 – Análise de EDS do CAA-1 (Espectros 1, 2 e 3)



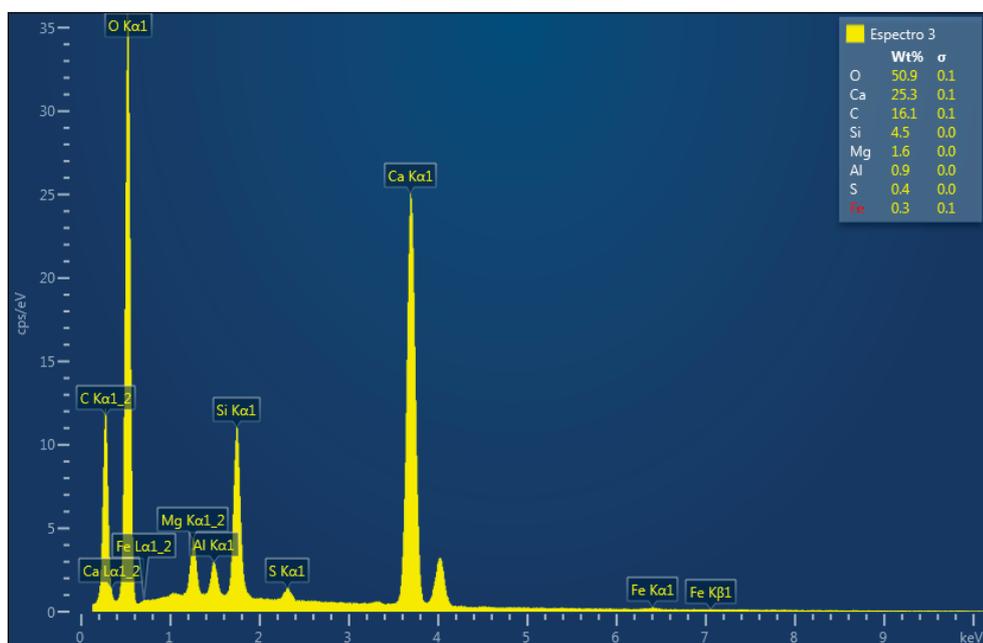
(a) Pontos de captura dos espectros 1,2 e 3 do CAA-1



(b) Gráfico EDS do Espectro 1 (CAA-1)



(b) Gráfico EDS do Espectro 2 (CAA-1)



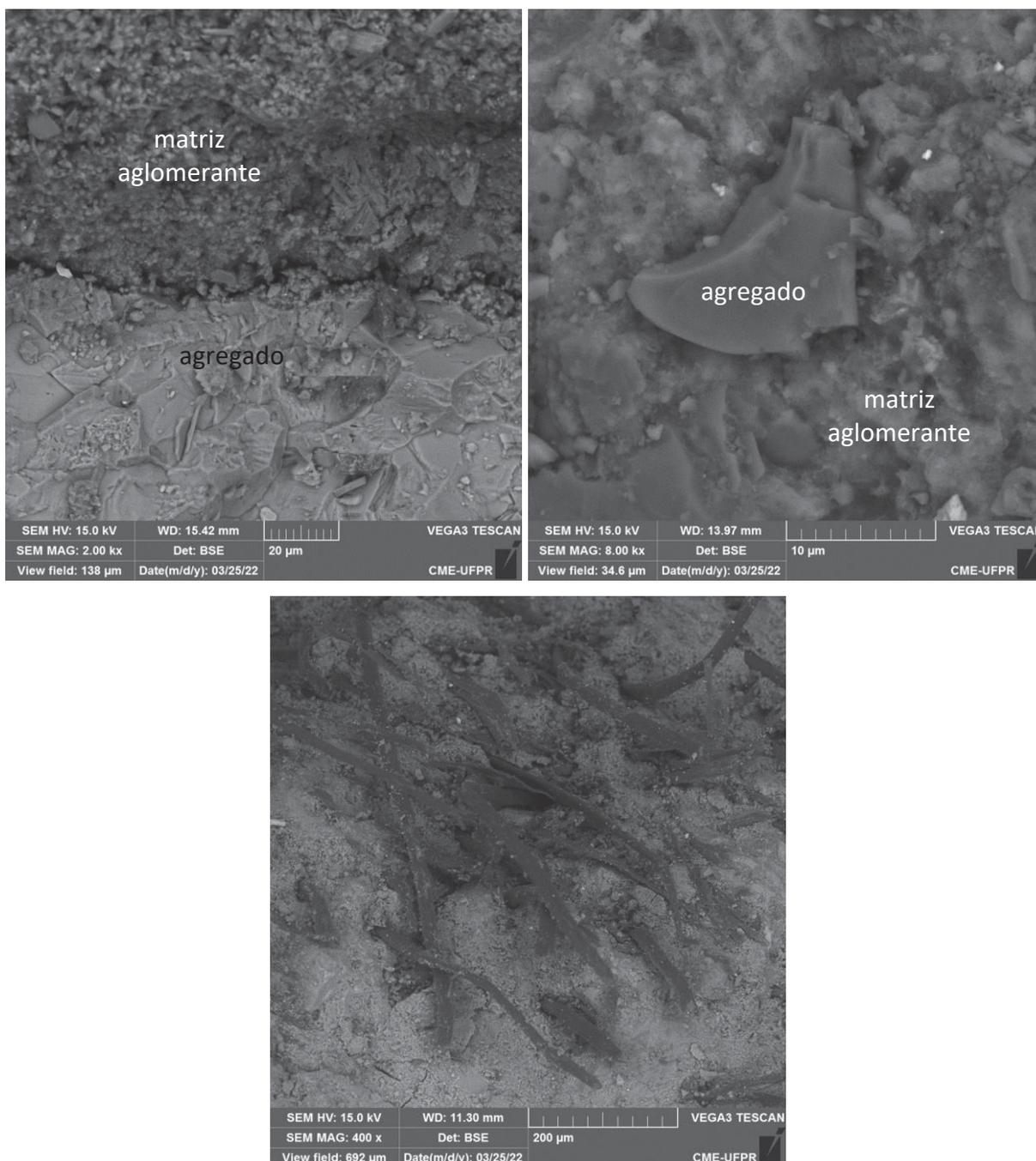
(c) Gráfico EDS do Espectro 3 (CAA-1)

Fonte: O autor (2022)

Observa-se que os elementos com maior concentração são o oxigênio e o cálcio, com média de 50% e 22%, respectivamente. Verifica-se, ainda, que os gráficos de EDS dos espectros 1 e 2 demonstram que nesses pontos da amostra há maior concentração de silício.

Observa-se, então, que nos espectros 1 e 2, localizados em pontos mais afastados da ZT, enquanto espectro 3 incide em uma região visualmente mais porosa, ou seja, provavelmente é uma região com menor quantidade de silicatos hidratados resultantes das reações do cimento, o que justifica a menor concentração de silício. Na Figura 47 são apresentadas as imagens de MEV do CAA-2.

Figura 47 – Imagens de MEV do CAA-2

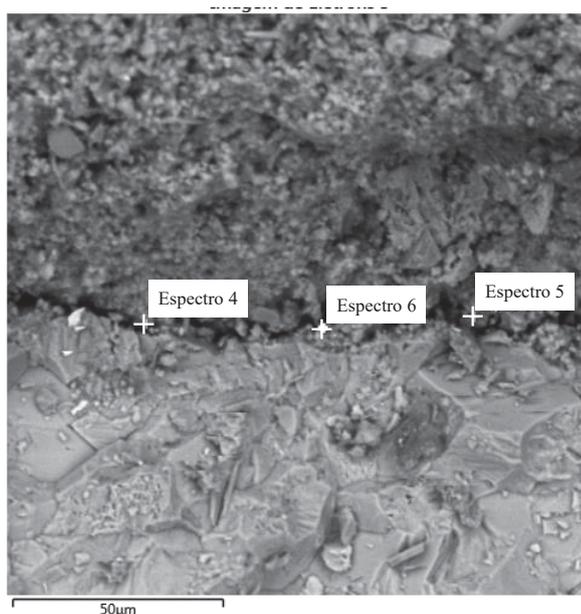


Fonte: O autor (2022)

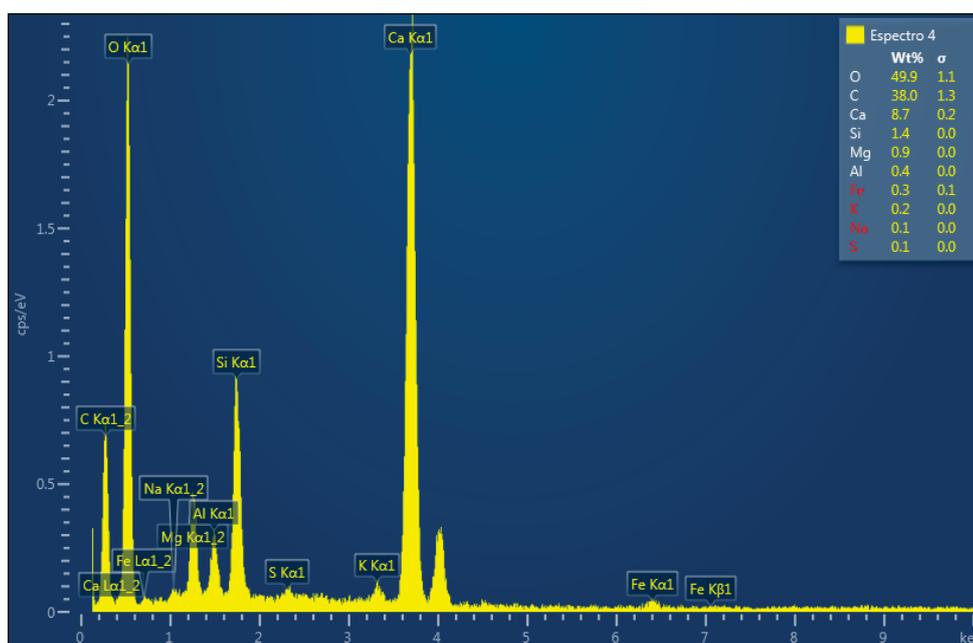
Nas duas primeiras imagens do CAA-2 também se visualiza a interface que divide a partícula de agregado e a matriz de cimento. Particularmente, na segunda imagem a ZT aparenta ser menos porosa. Na terceira imagem é possível identificar estruturas de coloração mais escura e formato alongado, com aparência de material fibroso.

Os gráficos de EDS da primeira imagem de MEV (Figura 47a) são apresentados na Figura 48 abaixo.

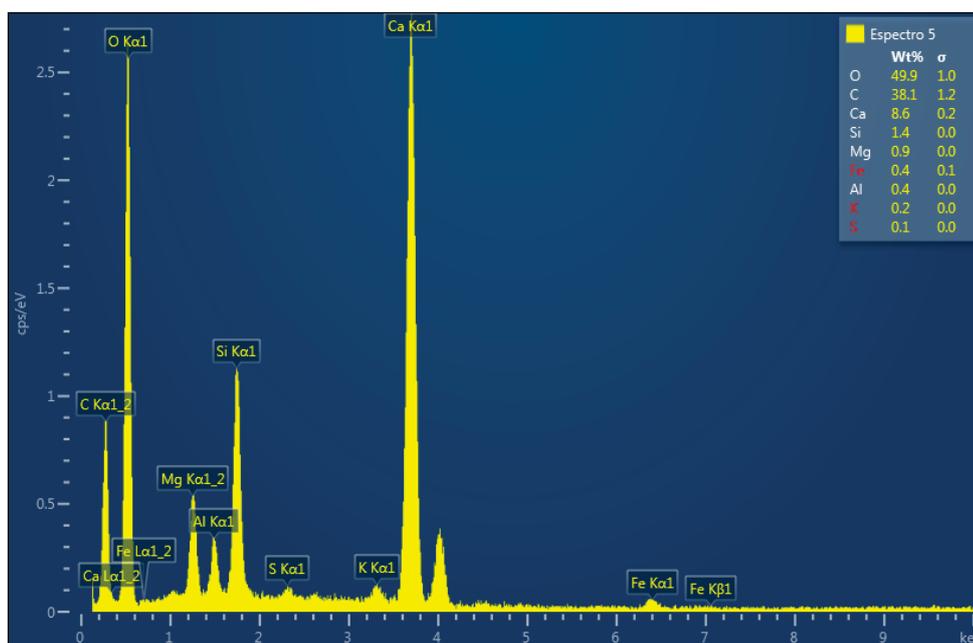
Figura 48 – Análise de EDS do CAA-2 (Espectros 4, 5 e 6)



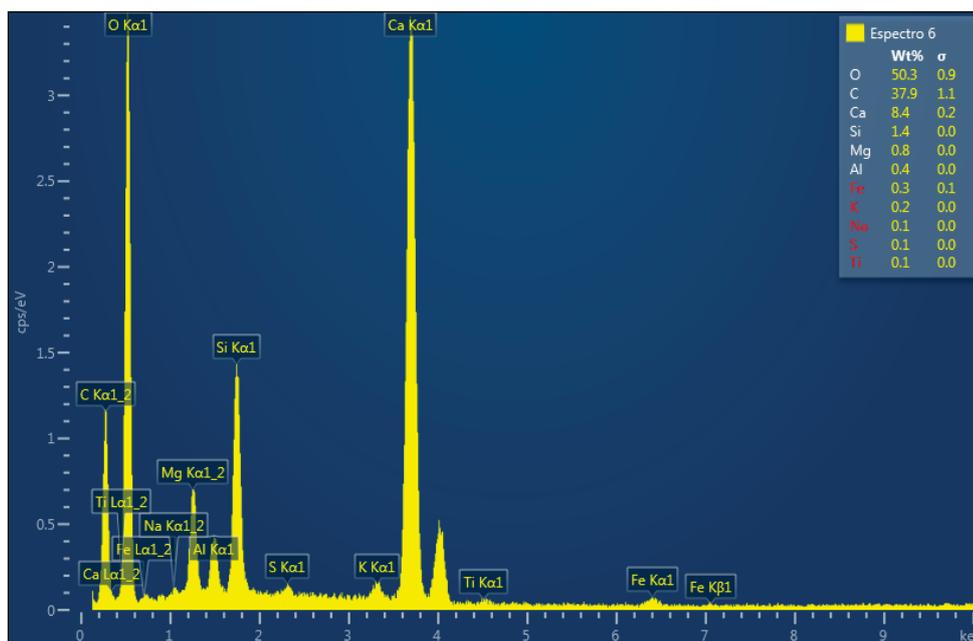
(a) Pontos de captura dos espectros 4, 5 e 6 do CAA-2



(b) Gráfico de EDS do Espectro 4 (CAA-2)



(c) Gráfico de EDS do Espectro 5 (CAA-2)



(d) Gráfico de EDS do Espectro 6 (CAA-2)

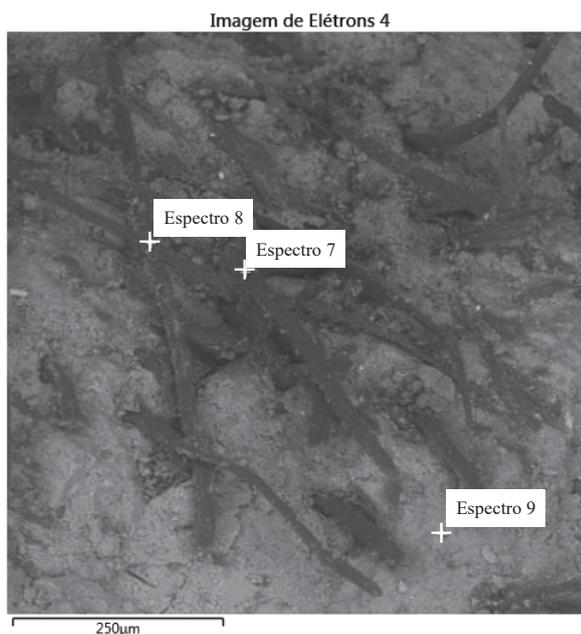
Fonte: O autor (2022)

Nos espectros analisados, os elementos predominantes são o oxigênio, com taxa de concentração de aproximadamente 50%, seguido do carbono, com cerca de 38% de concentração. Nota-se, ainda que há uma menor concentração de cálcio. Como o CAA-2 foi composto com duas adições pozolânicas (SA e CV), a intensidade das reações pozolânicas

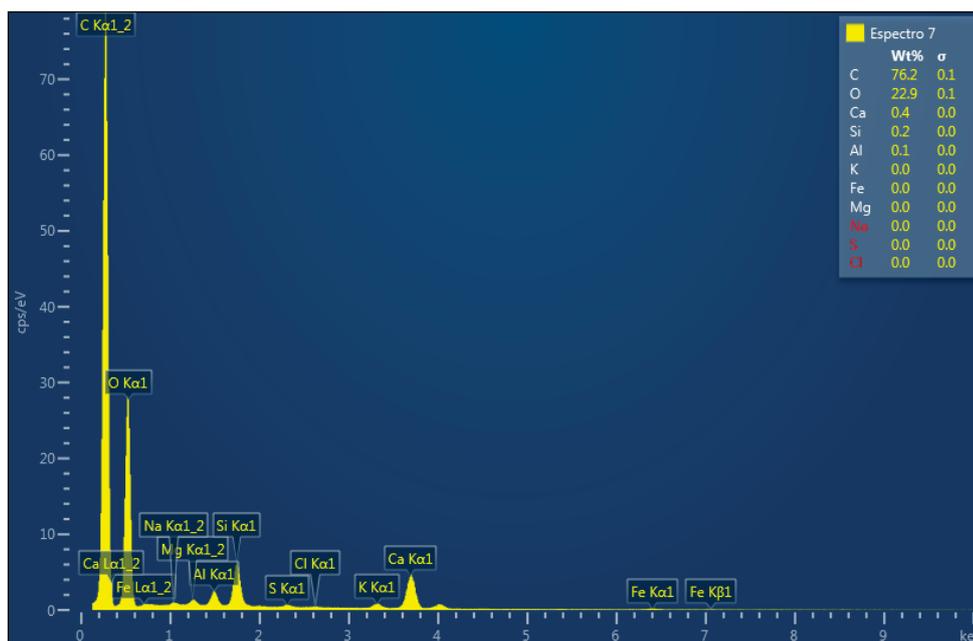
nesse concreto foi maior, provocando maior consumo de portlandita (hidróxido de cálcio). Por esse motivo, comparando com o EDS do CAA-1, a concentração de cálcio é bem menor.

Os gráficos de EDS da terceira imagem de MEV do CAA-2 (Figura 47c) são apresentados na Figura 49.

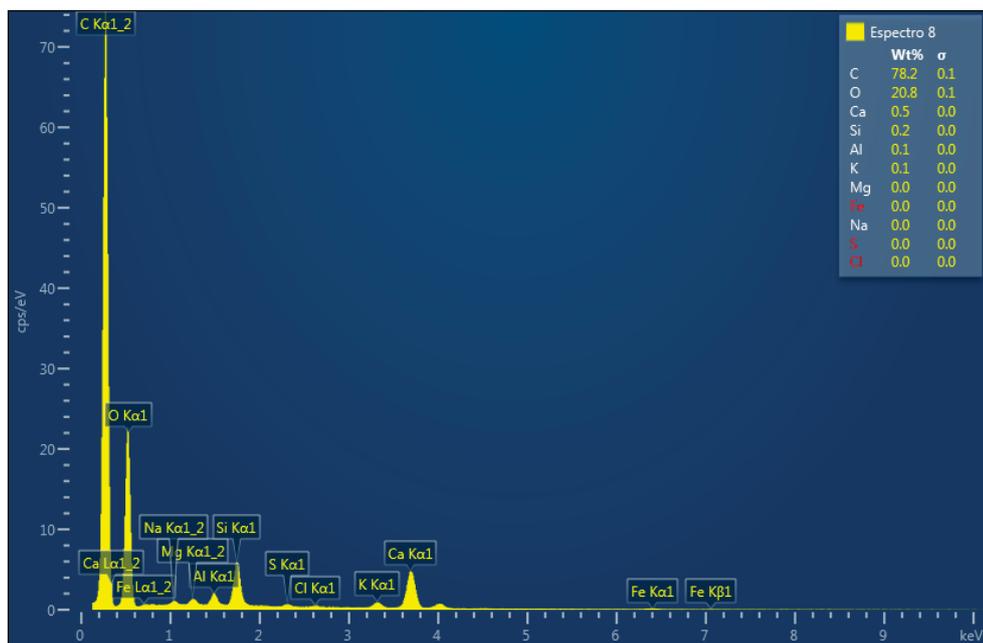
Figura 49 – Análise de EDS do CAA-2 (Espectros 7, 8 e 9)



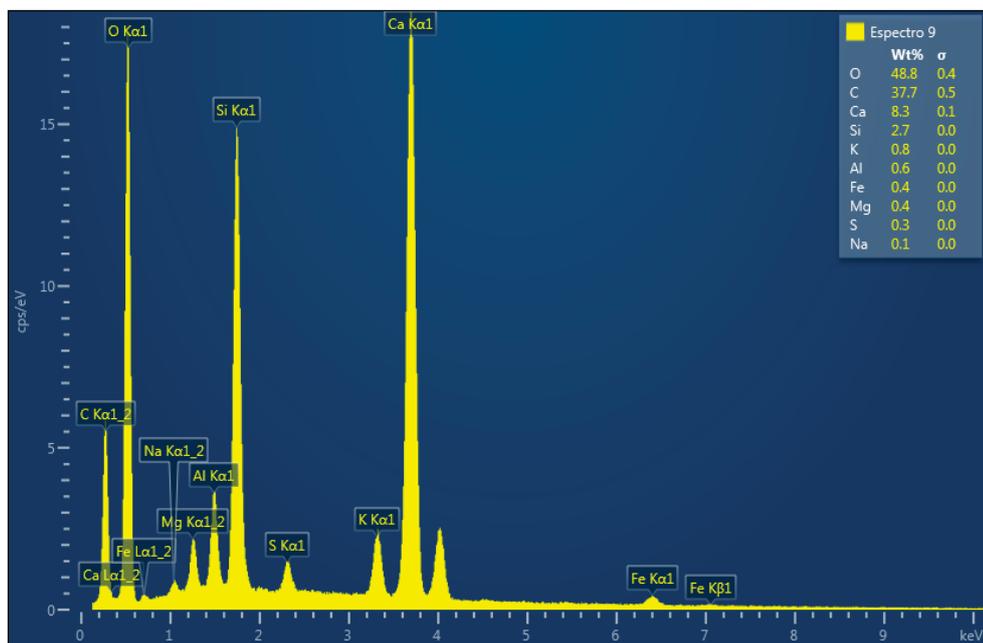
(a) Pontos de captura dos espectros 7, 8 e 9 do CAA-2



(b) Gráfico de EDS do Espectro 7 (CAA-2)



(c) Gráfico de EDS do Espectro 8 (CAA-2)



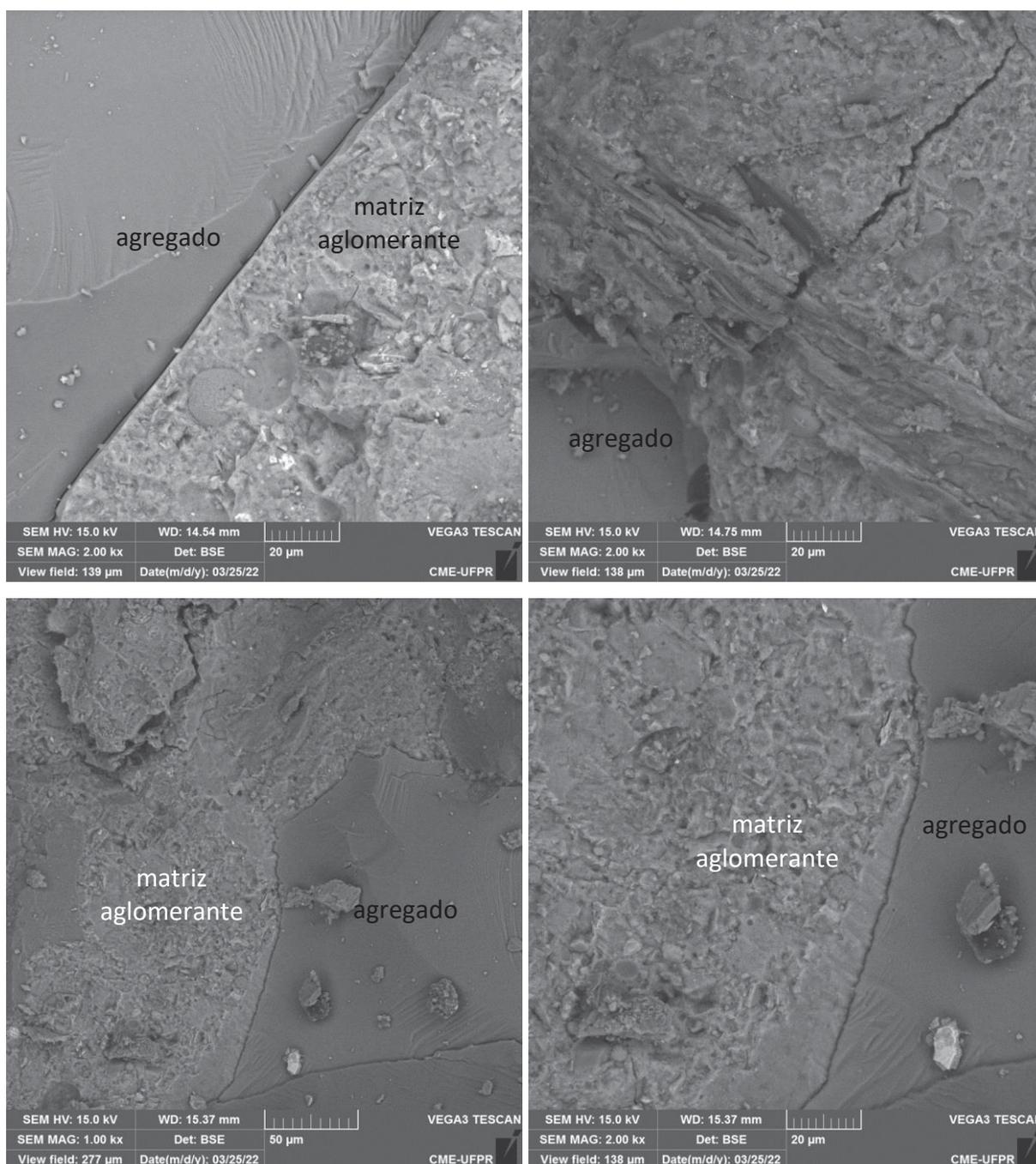
(d) Gráfico de EDS do Espectro 9 (CAA-2)

Fonte: O autor (2022)

Analisando os gráficos dos espectros 7 e 8, capturados exatamente na região dessas estruturas, verifica-se que a concentração de carbono é bastante elevada, em torno de 77%. Já no espectro 9, localizado fora dessa região, o elemento predominante é o oxigênio e a taxa de carbono é inferior. A partir dessa comparação, pode-se inferir que, provavelmente, essas estruturas são resíduos orgânicos presentes no agregado reciclado.

Na Figura 50 a seguir são apresentadas as imagens de MEV do CAA-3.

Figura 50 – Imagens de MEV do CAA-3

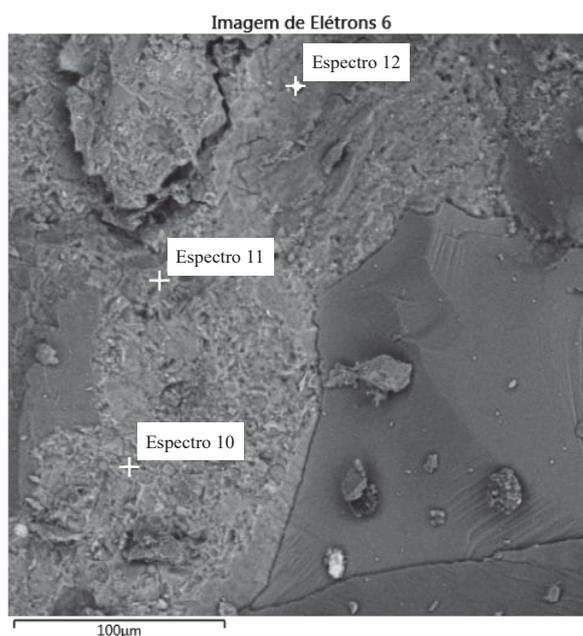


Fonte: O autor (2022)

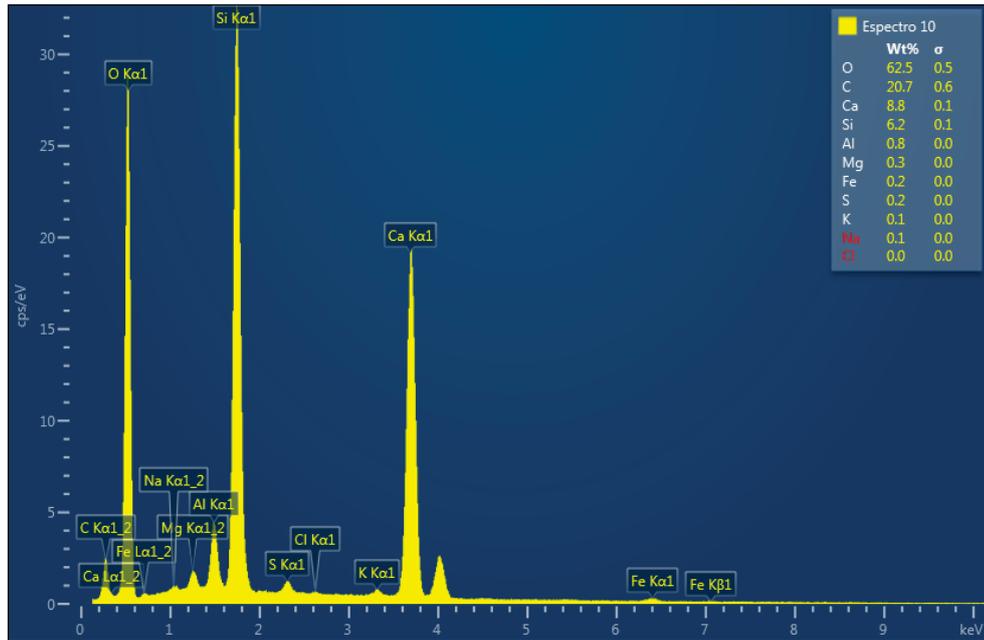
Apesar de o CAA-2 ter apresentado resultados de resistência mecânica mais altos, observa-se que a amostra do CAA-3 aparenta ter uma ZT mais densificada em comparação aos outros concretos. O que pode justificar essa característica é que o CAA-3 foi composto com 100% de brita natural, fator este que pode ter gerado uma melhor ligação entre a fase gráuda e a matriz aglomerante. Diferentemente, nos outros dois concretos, compostos com 100% de AGR, a camada residual de argamassa aderida às partículas da brita pode ter prejudicado a hidratação eficaz das partículas de aglomerantes presentes na região, conforme explicado anteriormente (ver 2.1.3.2).

Os gráficos de EDS obtidos para a terceira imagem (c) do CAA-3 (Figura 50c) são apresentados na Figura 51. Para essa análise optou-se por selecionar três pontos de espectro localizados na matriz de cimento da amostra.

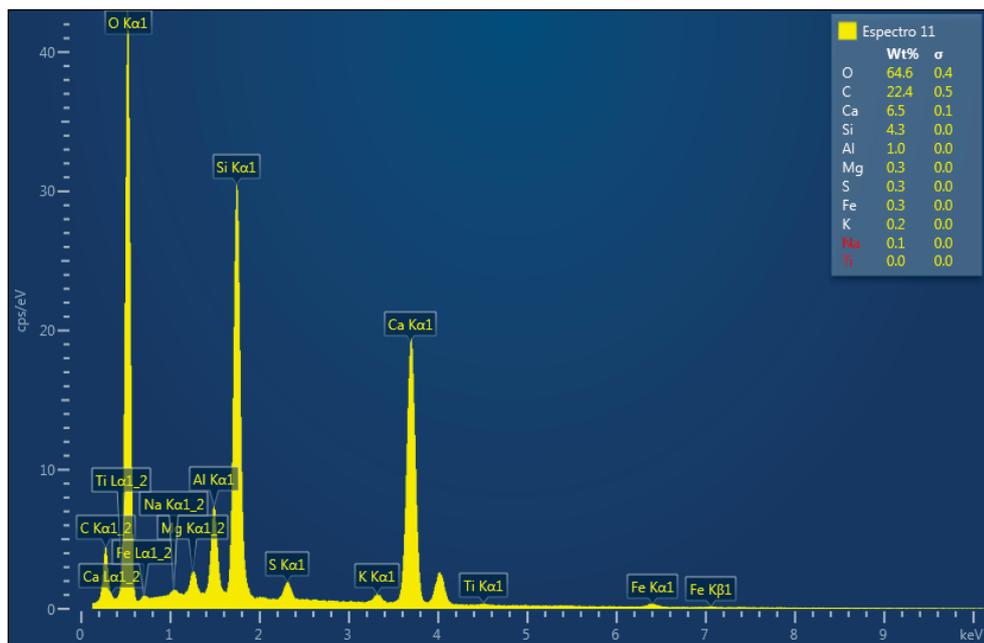
Figura 51 – Análise de EDS do CAA-3 (Espectros 10, 11 e 12)



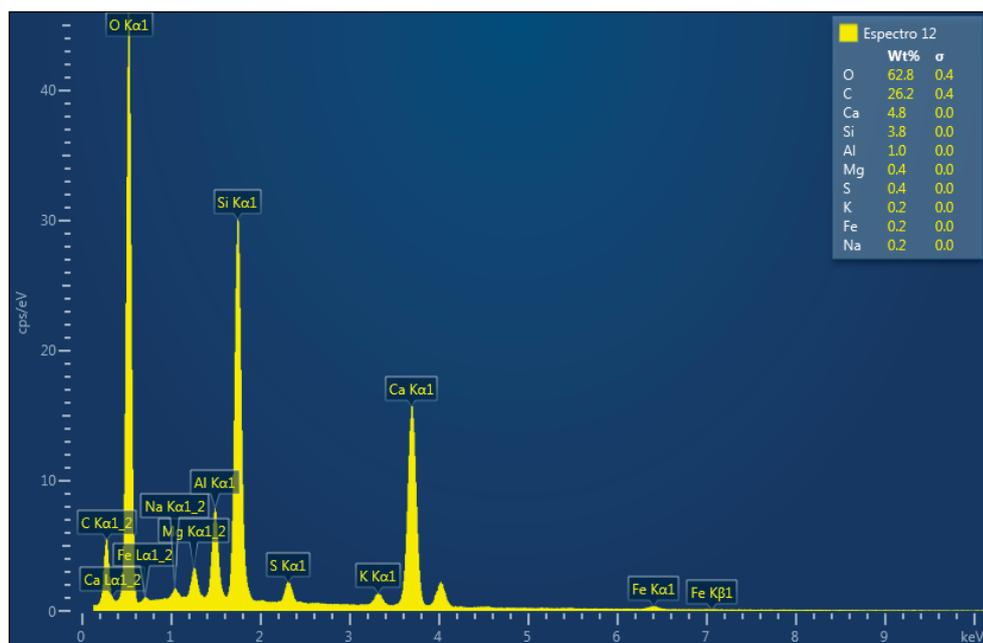
(a) Pontos de captura dos espectros 10, 11 e 12 do CAA-3



(b) Gráfico de EDS do Espectro 10 (CAA-3)



(c) Gráfico de EDS do Espectro 11 (CAA-3)



(d) Gráfico de EDS do Espectro 12 (CAA-3)

Fonte: O autor (2022)

Os elementos predominantes também foram o oxigênio, com concentração de aproximadamente 63%, e o carbono, com cerca de 23%. A concentração de cálcio nos três espectros dessa imagem também foi mais baixa em decorrência do uso combinado de sílica ativa e cinza volante, que resultam em maior consumo de portlandita.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no programa experimental e apresentados e discutidos no capítulo 4, conclui-se que:

O código desenvolvido em *Python* integrando o modelo de empacotamento de Alfred e o método de simulação de Monte Carlo gerou soluções eficientes de dosagem dos concretos. A partir das combinações de materiais simuladas, com substituição integral de uma das frações de agregado natural (miúda ou graúda) por agregado reciclado, o código foi capaz de prover composições com excelente grau de empacotamento para o módulo de distribuição $q = 0,25$. As combinações de proporções retornadas pelo código tiveram aproximação de 1,2 – 2,0% da curva de distribuição ideal dada pelo modelo de Alfred.

Os consumos resultantes da dosagem pelo modelo de Alfred atenderam aos limites de dosagem recomendados pelos guias do EFNARC (2005) e do ACI (2007) para concretos auto adensáveis. Além disso, proporcionou consumos otimizados dos materiais de cada traço, como por exemplo, a otimização do material pulverulento contido nos agregados reciclados, que contribuiu como incremento na fração fina das composições, resultando em consumos de cimento baixos para CAA (menores que 310 kg/m³).

Apesar do consumo de cimento ter sido baixo, o fator BI dos traços foi relativamente alto, variando de 12,0 a 19,8 kg/m³ se comparado a dados de outras pesquisas para CAA dosados com AN, que costumam variar na faixa de 6 a 12. Contudo, na literatura não foram encontrados trabalhos que apresentam o fator BI de CAA dosados com ARC para fins de uma comparação mais efetiva. Essa constatação demonstra, inclusive, que ainda há muitos assuntos a serem explorados na linha de estudos envolvendo o uso de ARC na produção de CAA. Diante disso, os resultados coletados no presente trabalho poderão ter bastante valor e contribuir no desenvolvimento de futuras pesquisas.

O principal desafio da dosagem dos concretos foi o de contornar os efeitos adversos dos agregados reciclados a fim de conciliar a obtenção de concretos com as propriedades desejadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Isso porque, devido as particularidades desses materiais, sobretudo a elevada absorção de água e as características de formato mais angular e textura mais rugosa, as misturas demandaram quantidade de água para alcançar o grau de fluidez necessário para caracterizá-las como auto adensáveis, o que acarretou maior dificuldade de obter concretos com resistência mecânica estrutural.

Apesar disso, de maneira geral, os três concretos produzidos a partir das dosagens formuladas, quando testados em laboratório, apresentaram características satisfatórias de fluidez e habilidade passante no estado fresco, podendo ser qualificados como misturas auto adensáveis. Além disso, o elevado teor de material fino contido nos agregados reciclados proporcionou bastante coesão e estabilidade às misturas, contribuindo positivamente no controle da resistência à segregação, e dispensando o uso de aditivo modificador de viscosidade.

Quanto ao estado endurecido, de modo geral, o CAA-2 apresentou os melhores resultados, tanto de resistência mecânica quanto de absorção de água. Esse resultado pode estar atribuído à menor relação a/agl do traço, ao maior consumo total de aglomerantes e também à formulação que contém somente brita reciclada.

Já os concretos CAA-1 e CAA-3, produzidos com brita natural e areia reciclada e com uso misto de agregado reciclado (brita e areia), respectivamente, não atingiram resistência mecânica mínima de 20 MPa aos 28 dias de idade, o que impediria a aplicação prática como concretos estruturais, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Conforme a literatura, diversos estudos demonstram que a substituição de areia natural por areia reciclada provoca maiores prejuízos as propriedades do concreto no estado endurecido do que a substituição de brita natural por brita reciclada.

Esse resultado enfatiza que a produção de concretos auto adensáveis com uso de areia reciclada ou uso combinado de brita e areia recicladas permanece sendo um desafio, devido à maior dificuldade de compensar a taxa de absorção desses materiais. Contudo, a viabilidade de uso desses materiais na produção de concretos pode ser alcançada mediante avanço nas técnicas de caracterização e tratamento ou, ainda, mediante adoção de métodos de dosagem mais rigorosos. Nesse sentido, os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que a abordagem de empacotamento de partículas pode contribuir para obter dosagens com maior otimização de uso dos agregados reciclados.

Finalmente, pode-se concluir que o objetivo proposto para o trabalho foi alcançado a partir dos seguintes pontos: mediante a aplicação do modelo de empacotamento de partículas de Alfred, foram obtidas composições de concreto que, quando produzidas em laboratório, resultaram em misturas com características de auto adensabilidade no estado fresco; em relação ao estado endurecido, dentre os três concretos produzidos, dois obtiveram desempenho mecânico adequado para aplicação estrutural.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar e comparar outros modelos de empacotamento de partículas para dosar concretos auto adensáveis com agregados reciclados de concreto; inclusive, métodos de determinação da densidade de empacotamento experimental do conjunto granular, como o método das misturas sucessivas (ver 2.2.4) ou o método de Wong e Kwan para concretos;
- Desenvolver dosagens de CAA com areia reciclada e agregado graúdo de dimensão máxima característica de 9,5 mm (Brita 0) na tentativa de reduzir o consumo de água das misturas, porém mantendo as características reológicas visando obter melhor desempenho mecânico do concreto;
- Investigar como as características morfológicas de tamanho, formato e textura dos ARC influenciam nas propriedades de concretos autoadensáveis no estado fresco e endurecido;
- Realizar estudos de dosagem em pastas contendo material de RCD a fim de otimizar o consumo de água dos concretos em função da densidade de empacotamento;
- Explorar processos de mistura mais eficientes para a produção de CAA dosados com ARC a fim de mitigar o efeito adverso da elevada absorção de água desses materiais na autoadensibilidade e na resistência mecânica do concreto;
- Avaliar o desempenho de CAA dosados por empacotamento de partículas e produzidos com agregados reciclados previamente tratados com soluções químicas;
- Aplicar a abordagem de empacotamento de partículas na dosagem de concretos auto adensáveis comparando o uso de agregados reciclados oriundos de resíduos de concretos de diferentes classes de resistência, inclusive concretos de alta resistência;
- Avaliar a durabilidade de concretos auto adensáveis produzidos com agregados reciclados de concreto aplicando técnicas de empacotamento de partículas na dosagem, como a frente de carbonatação e a resistência à penetração de cloretos e sulfatos.

REFERÊNCIAS

ABED, M.; NEMES, R.; TAYEH, B. A. Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 32, n. 2, p. 108-114, 2020.

AGRELA, F.; ALAEJOS, P.; DE JUAN, M. S. Properties of concrete with recycled aggregates. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing, 2013, p. 304-329.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 237. Self-Consolidating Concrete. **ACI 237-07**. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA, 2007.

ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASHISH, D. K.; VERMA, S. K. An overview on mixture design of self-compacting concrete. **Structural Concrete**, 20(1), 371-395, 2019.

ASLANI, F.; MA, G.; WAN, D. L. Y.; MUSELIN, G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. **Journal of Cleaner Production**, 182, 553-566, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2019.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46:** Agregados–Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2021a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-3**. Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017e.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO (ABRECON). **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). **O Mercado de Agregados no Brasil: Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção**. São Paulo, 2015. Disponível em: http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/download/69_04062b071b7171f3481b7a0e8f36f5ac. Acesso em 27 out. 2020.

BAHRAMI, N.; ZOHRABI, M.; MAHMOUDY, S. A.; AKBARI, M. Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**, 101361, 2020.

BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. G.; MENDES, L. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente construído**, 8(4), 51-60, 2008.

BENTZ, D. P.; AİTCIN, P-C. The hidden meaning of water-cement ratio. **Concrete international**, v. 30, n. 5, p. 51-54, 2008.

BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, E.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. **Waste Management** 25, 149. 2005.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, 61(358), 178-189, 2015.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, 35(11), 2116-2136, 2005.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121907, 2020.

CARRO-LÓPEZ, D.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; DE BRITO, J.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; GONZÁLEZ-TABOADA, I.; SILVA, P. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 96, 491-501, 2015.

CAVALIERE, I.; CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; JACINTHO, A. E. Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis dosados por empacotamento de partículas. In **HAC 2018. V Congreso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales**, pp. 147-156, Editorial Universitat Politècnica de València, 2018.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. Use of recycled aggregates in construction. **Cement Concrete & Aggregates**, New South Wales, Australia, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) **Resolução N° 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 5 de julho. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>, 2002.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. The role of industrial by-products in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 25(8), 3181-3186, 2011.

COSTA, A. C. S. S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 289-301, 2019.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto autoadensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

DAMINELI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN, V.M.. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.

DE BRITO, J.; SAIKIA, N. **Recycled aggregate in concrete**: Use of industrial, construction and demolition waste. Springer Science & Business Media.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, 55(333), 18-32, 2009.

DE LARRARD, F. (1999). **Concrete mixture proportioning**: a scientific approach. CRC Press.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1699-1704, 2002.

DJERBI, A. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete, *Construction and Building Materials*, 190, 1023–1033, 2018.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58 (10), 683–690, 2005.

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use**, 2005.

FAKITSAS, C. G.; PAPAKONSTANTINOY, P. E. A.; KIOUSIS, P. D.; SAVVA, A. Effects of recycled concrete aggregates on the compressive and shear strength of high-strength self-consolidating concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(4), 356-361, 2012.

FENNIS, S. A.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Heron*, 57, 2012.

FENNIS, S. A.; WALRAVEN, J. C.; DEN UIJL, J. A. The use of particle packing models to design ecological concrete. *Heron*, 54 (2/3), 2009.

FENNIS, S.A.A.M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. Tese (Doutorado) –Technische Universiteit Delft, Amersfoort, Holanda, 2011.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, 63(8), 617-627, 2011.

FIOL, F.; THOMAS, C.; MUÑOZ, C.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M. The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 182, 309-323, 2018.

FUNK, J.; DINGER, D. **Predictive process control of crowded particulate suspensions**. Springer Science + Business Media, LL, 1994.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; ÖZ, H. Ö.; TAHA, I.; YASEMIN, M. T. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 98, 334-344, 2015.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. D. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 172, 2009.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; EIRAS-LÓPEZ, J.; ROJO-LÓPEZ, G. Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. **Journal of Cleaner Production**, 156, 1-18, 2017b.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; SEARA-PAZ, S. Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 18-25, 2017.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; SEARA-PAZ, S. Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 157, 18-25, 2017a.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; PÉREZ-ORDÓÑEZ, J. L.; EIRAS-LÓPEZ, J. Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience. **Construction and Building Materials**, 131, 641-654, 2017c.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, F.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis, **Materiales de Construcción** 66 (323), 1–18, 2016.

GOODIER, C. I. Development of self-compacting concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, 156(4), 405-414, 2003.

GRDIC, Z. J., TOPLICIC-CURCIC, G. A., DESPOTOVIC, I. M.; RISTIC, N. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, 24(7), 1129-1133, 2010.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ALGIN, Z.; YAZICI, H. Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 172-183, 2014.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ALGIN, Z.; YAZICI, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 113, 622-630, 2016.

GUPTA, P. K.; Rajhans, P.; Panda, S. K.; Nayak, S.; Das, S. Mix design method for self-compacting recycled aggregate concrete and its microstructural investigation by considering adhered mortar in aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 3, 2020.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 edição. São Paulo–SP, editora PINI, 1993.

HELENE, P. H.; TUTIKIAN, B. Desconhecimento impede maior adoção do concreto autoadensável no Brasil. **Revista Grandes Construções**, São Paulo, n. 63, set. 2015. Entrevista.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, Ananth. A Review on Fly Ash Characteristics – Towards Promoting High Volume Utilization in Developing Sustainable Concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, n. 1, p. 546-559, 2017.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A., SILVA, S. L. D.; KLEIN, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 9, p. 48-65, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **2018 Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/30a31866-26ed-4c57-9d6f-3d382442b3fb/2018_Global_Status_Report.pdf>. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement**, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. 2021.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: Geraldo C Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1871-1884.

KALOS, Malvin H.; WHITLOCK, P. A. **Monte Carlo methods**. John Wiley & Sons, 2009.

KANADASAN, J.; RAZAK, H. A. Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, 9-19, 2014.

KANADASAN, J.; RAZAK, H. A. Engineering and sustainability performance of self-compacting palm oil mill incinerated waste concrete. **Journal of Cleaner Production**, 89, 78-86, 2015.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste: A Miniature Slump Test. **Cement and Concrete Aggregates**, vol. 2, p. 95–102, 1980.

KASHANI, A.; NICOLAS, R. S.; QIAO, G.G.; DEVENTER, J.S.V.; PROVIS, J.L. Modelling the Yield Stress of Ternary Cement-slag-fly Ash Pastes Based on Particicle Size Distribution. **Powder Technology**, v. 266, n. 11, p. 203-209, 2014.

KEBAİLİ, O.; MOURET, M.; ARABI, N.; CASSAGNABERE, F. Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. **Journal of Cleaner Production**, 87, 752-761, 2015.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, 32(9), 679-686, 1999.

KHEDER, G. F.; AL JADIRI, R. S. New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements. **ACI Materials Journal**, 107(5), 2010.

KIBERT, C. J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. John Wiley & Sons, 2016.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S. C. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, 131, p. 721-740, 2017.

KLEIN, N. S.; LENZ, L. A.; MAZER, W. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. **Construction and Building Materials**, 242, 2020.

KLEIN, N. S.; A., A.; Toralles-Carbonari, B. M.; Real, L. V. Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. **Construction and Building Materials**, 69, 213-220, 2014.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 31(9), 622-627, 2009.

KUMAR, S.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **Indian Concrete Journal**, 77(9), 1324-1331, 2003.

LEE, C. Y.; LEE, H. K.; LEE, K. M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 425-431, 2003.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, 81, 38-48, 2016.

LEITE, M. B.; LIMA, P. R. L. Experimental and Statistical Evaluation of the Interaction Effect of Recycled Aggregate and Water/Cement Ratio on Concrete Compressive Strength. **Recent Progress in Materials**, v. 3, n. 3, p. 1-16, 2021.

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 33-42, 2013.

LI, L. G.; LIN, C. J.; CHEN, G. M.; KWAN, A. K. H.; JIANG, T. Effects of packing on compressive behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 157, 757-777, 2017.

LIN, YONG-HUANG; TYAN, YAW-YAUAN; CHANG, TA-PENG; CHANG, CHING-YUN. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, 34, 1373 – 1380, 2004.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, 63(365), 22-33, 2017.

LONG, W. J.; GU, Y.; LIAO, J.; XING, F. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, 167, 317-325, 2017.

MADDURU, S. R. C.; KONTHAM, L. R.; PANCHARATHI, R. K.; SIEMPU, R. Mix model for self-compacting concrete with recycled aggregate. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, 170(2), 131-142, 2017.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R.; GUERRA-ROMERO, M. I.; MORÁN-DEL POZO, J. M.; BRITO, J. D.; JUAN-VALDÉS, A. Recycling aggregates for self-compacting concrete production: A feasible option. **Materials**, 13(4), 868, 2020.

MATOS, P.R.; FOIATO, M.; PRUDENCIO JR, L.R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 282-293, 2019.

MATOS, P.R.; SAKATA, R.D.; PRUDENCIO JR, L.R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941-955, 2019.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 340-353, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais, 3, 2014.

MELO, A. V. S. **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D.. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MIRANDA, L. F.; NEVES, F. H.; OLIVEIRA, L. B.; UHMANN, I. M. S.I. Conexões eficazes na gestão de resíduos de construção e demolição: diretrizes para Curitiba. In: **XV Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**, Maceió. Anais... Maceió, 2014, p.2502-2511, 2014.

MOHAMMED, S. I.; NAJIM, K. B. Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. **In Structures**, 23, pp. 34-43, 2020.

MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. 2003. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONTEIRO, P. J. M; MILLER, Sabbie A.; HORVATH, Arpad. Towards sustainable concrete. **Nature materials**, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

MOREIRA, K. M. V. **Concreto Autoadensável Com Agregados Graúdos Reciclados De Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE), 2012.

MUELLER, F. V.; WALLEVIK, O. H.; KHAYAT, K. H. Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance. **Cement and Concrete Composites**, 54, 117-125, 2014.

MWASHA, A.; RAMNATH, R. Manufacturing concrete with high compressive strength using recycled aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 30(8), 04018182, 2018;

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. **Cement and concrete composites**, 33(3), 353-358, 2011.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, 26(1), 317-326, 2012.

NILI, M.; SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. **Materials**, 12(7), 1120, 2019.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, 1(1), 5-15, 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K. Mix design for self-compacting concrete. **Concrete library of JSCE**, 25(6), 107-120, 1995.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, 1(1), 3-17, 2000.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas-princípios e aplicações em processamento cerâmico, **Fazendo Arte Editorial**, S. Paulo, Brasil, 119, 2000.

OMRANE, M.; RABEHI, M. Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 247, 118-576, 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y. (Ed.). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Elsevier, 2013.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 23(2), 829-836, 2009.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, 105(3), 2109-2135, 2015.

PASCHOALIN FILHO, J., DUARTE, E.; FARIA, A. (2016). Geração e manejo dos resíduos de construção civil nas obras de edifício comercial na cidade de São Paulo. **Espacios**, 37 (6), 30.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, 175, 324-332, 2018.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã ou rocha ou poliamida**. 2009. 281 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 18(6), 461-468, 2004.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, 34(1), 31-36, 2004.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Impact of particle packing mix design method on fracture properties of natural and recycled aggregate concrete. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 42(4), 943-958, 2019.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction and Building Materials**, 152, 269-284, 2017.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, Sudhirkumar V. Impact of particle packing mix design method on fracture properties of natural and recycled aggregate concrete. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 42, n. 4, p. 943-958, 2019.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Multi-scale characterisation of recycled aggregate concrete and prediction of its performance. **Cement and Concrete Composites**, 106, 103480, 2020.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Areia e sustentabilidade: 10 recomendações estratégicas para evitar uma crise**. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38362/sand_sustainability.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. 2022.

RADHIKA, K. L.; KUMAR, P. R.; CHAND, M. S. R.; PRASAD, B. Optimization of Mix Proportioning for Self Compacting Concrete using Particle Packing Theories. **Indian Concrete Journal**, 2016.

RAJHANS, P.; CHAND, G.; KISKU, N.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Proposed mix design method for producing sustainable self-compacting heat cured recycled aggregate concrete and its microstructural investigation. **Construction and Building Materials**, 218, 568-581, 2019.

RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Sustainable self-compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. **Construction and Building Materials**, 163, 557-570, 2018.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2011.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

ROQUIER, G. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) for crushed aggregate particles. **Powder technology**, 320, 133-142, 2017.

RWAMAMARA, R.; SIMONSSON, P. Self-compacting concrete use for construction work environment sustainability. **Journal of Civil Engineering and Management**, 18(5), 724-734, 2012.

SALESA, Á.; PÉREZ-BENEDICTO, J. Á.; ESTEBAN, L. M.; VICENTE-VAS, R.; ORNA-CAMRONA, M. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. **Construction and Building Materials**, 153, 364-373, 2017.

SEBAIBI, N.; BENZERZOUR, M.; SEBAIBI, Y.; ABRIAK, N. E. Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard. **Construction and Building Materials**, 43, 382-388, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2020**. São Paulo. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf>. 2020.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**, 178, 19-31, 2018.

SILVA, Y. F.; ROBAYO, R. A.; MATTEY, P. E.; DELVASTO, S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. **Construction and Building Materials**, 124, 639-644, 2016.

SINGH, N.; MITHULRAJ, M.; ARYA, S. Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin. **Resources, Conservation and Recycling**, 144, 240-251, 2019.

SINGH, R. B.; SINGH, B. Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 161, 354-364, 2018.

STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder technology**, 48(1), 1-12, 1986.

SU, N.; HSU, K. C.; CHAI, H. W. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and concrete research**, 31(12), 1799-1807, 2001.

SUN, Y.; WANG, Z.; GAO, Q.; LIU, C. A new mixture design methodology based on the Packing Density Theory for high performance concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, 182, 80-93, 2018.

SUNAYANA, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method. **Construction and Building Materials**, 156, 376-386, 2017.

TAM, V. W.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2005.

TAM, V. W.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA^{asc}. **Construction and Building Materials**, 22(10), 2068-2077, 2008.

TANG, W.; KHAVARIAN, M.; YOUSEFI, A.; CUI, H. Properties of self-compacting concrete with recycled concrete aggregates. In: **Siddique, R. Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications**. Woodhead Publishing, 2020, p. 219-244.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, 19, 349-365, 2018.

THOMAS, N. I. R.; COSTA, D. B. Adoption of environmental practices on construction sites. **Ambiente Construído**, 17(4), 9-24, 2017.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

TUYAN, M.; MARDANI-AGHABAGLOU, A.; RAMYAR, K. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. **Materials & Design**, 53, 983-991, 2014.

UYGUNOĞLU, T.; TOPÇU, İ. B.; ÇELİK, A. G. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. **Journal of cleaner production**, 84, 691-700, 2014.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

WANG, X.; WANG, K.; TAYLOR, P.; MORCOUS, G. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method. **Construction and Building Materials**, 70, 439-452, 2014.

WONG, V.; CHAN, K. W.; KWAN A. K. H. Applying theories of particle packing and rheology to concrete for sustainable development. **Organization, technology & management in construction: an international journal**, v. 5, n. 2, p. 844-851, 2013.

WONG, V.; KWAN, A. K. H. A 3-parameter model for packing density prediction of ternary mixes of spherical particles. **Powder technology**, 268, 357-367, 2014.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD) – Cement Sustainability Initiative's (CSI). **Getting the Numbers Right (GNR) Project**, 1st ed.; World Business Council for Sustainable Development: Geneva, Switzerland. Disponível em: <http://www.wbcdcement.org/index.php/key-issues/climate-protection/gnrdatabase>. Acesso em 31 out de 2020.

YOUCAI, Z.; SHENG, H. **Pollution Control and Resource Recovery: Industrial Construction and Demolition Wastes**. Butterworth-Heinemann, 2017.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**, 25, 100815, 2019.

YU, R.; SPIESZ, P. H. J. H.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, 55, 383-394, 2015.

ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 66-74, 2015.

ZUO, W.; LIU, J.; TIAN, Q.; XU, W.; SHE, W.; FENG, P.; MIAO, C. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories. **Construction and Building Materials**, 163, 938-948, 2018.

APÊNDICE A – METODOLOGIA DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

O *Methodi Ordinatio*, proposto por Pagani, Kovaleski e Resende (2015) é uma metodologia que propõe a classificação e seleção de artigos científicos, conforme sua relevância, para a criação de um portfólio bibliográfico. O método é composto de nove passos, os quais são descritos na sequência.

A-1. Definição da intenção de pesquisa

O primeiro passo consiste em definir a intenção de pesquisa, a partir de um tema de estudo. A princípio, a ideia formulada para o desenvolvimento da pesquisa era investigar se a aplicação das técnicas de empacotamento de partículas permite minimizar os efeitos adversos causados pelo uso de ARC no CAA.

A-2. Pesquisa exploratória preliminar

O segundo passo do método consiste em realizar uma pesquisa exploratória preliminar. Para tanto, possíveis combinações de palavras-chaves que representem a intenção de pesquisa foram testadas em diferentes bases de dados eletrônicas.

Destaca-se que essa é uma etapa importante do método, pois o número de artigos de cada busca é um indicativo sobre o grau de exploração do tema de pesquisa na literatura. Buscas que retornam um número alto de publicações indicam que possivelmente o tema já é bem explorado e que a chance de haver lacunas de pesquisa é menor. Por outro lado, um número baixo de artigos sugere que, provavelmente, o assunto a ser estudado abrange tópicos que ainda não foram investigados em sua totalidade e que a chance de identificar oportunidades de pesquisa é maior.

Essa análise dos resultados de busca permite ao pesquisador avaliar se a intenção de pesquisa definida possui relevância científica ou se já existem muitos estudos que contemplam o assunto, o que sugere ao pesquisador que talvez sua intenção de pesquisa deva ser reformulada. Partindo da intenção de pesquisa, admitiu-se que revisão da literatura deve ser dividida em dois eixos principais:

- Eixo 1: efeitos da incorporação de ARC nas propriedades de CAA no estado fresco e endurecido.
- Eixo 2: abordagem dos conceitos de empacotamento de partículas na dosagem de composições de CAA e concretos com agregados de RCD.

Seguindo essa lógica, foram pré-selecionadas as palavras-chaves (no idioma inglês) que melhor representam cada eixo do tema de estudo. Para o eixo 1 as palavras-chaves pré-selecionadas foram: *self-compacting concrete* e *recycled aggregates*. Para o eixo 2 as palavras-chaves pré-selecionadas foram: *self-compacting concrete*, *particle packing* e *recycled aggregates*.

Durante esta etapa de pesquisa exploratória, as combinações envolvendo as palavras-chaves acima foram testadas a fim de investigar os números de artigos retornados e avaliar se deveriam ser feitos ajustes para melhorar os filtros de busca.

Isso porque dependendo dos resultados obtidos para determinada combinação, poderia ser conveniente substituir algumas palavras-chaves ou incluir novas.

Para realizar a busca de artigos, foram escolhidas quatro bases de dados: *Science Direct*, *Scopus*, *Web of Science* e Scielo. As três primeiras abrangem trabalhos científicos desenvolvidos em diversos países do mundo. Nessas bases as buscas foram restringidas a trabalhos no idioma inglês. Previamente, optou-se por também incluir a base de dados Scielo para possibilitar a seleção de publicações no idioma português.

Definidos os critérios acima, as combinações das palavras-chaves foram testadas nas quatro bases de dados. As buscas foram realizadas em duas modalidades e o número de publicações retornado para cada uma foi registrado. A primeira modalidade processa uma busca completa que retorna artigos nos quais os termos inseridos são mencionados em qualquer campo do texto, independente da seção do trabalho. A outra é uma modalidade mais restritiva, na qual os artigos retornados contêm as palavras-chaves exclusivamente no título, resumo ou palavras-chaves especificadas pelo autor, conhecido como TAK (do inglês, *Title, Abstract and Keywords*).

Dentre as quatro bases de dados testadas na busca exploratória preliminar, a base Scielo não retornou nenhum artigo para a maioria das combinações testadas pelas duas modalidades de busca, portanto, foi removida das opções. Então, as três bases de dados escolhidas para a pesquisa foram a *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*.

Observou-se, também, que as buscas realizadas pela primeira modalidade retornam um número alto de artigos, pois mesmo os trabalhos que mencionam as palavras-chaves escolhidas em campos aleatórios do texto são computados na contagem. Por esse motivo, constatou-se que a primeira modalidade de busca retorna muitos artigos que se afastam dos assuntos predominantes da intenção da pesquisa. Portanto, optou-se por adotar a modalidade de busca pelo filtro “TAK” para todas as combinações de palavras-chaves.

Contudo, particularmente para o Eixo 2 de pesquisa, ao testar a combinação de palavras-chaves envolvendo as três palavras-chaves (*self-compacting concrete*, *particle packing* e *recycled aggregates*) pela segunda modalidade de busca, somente um resultado foi obtido nas quatro bases de dados.

É interessante notar que esse resultado demonstra que, até o presente momento, dosagens de misturas de concretos autoadensáveis com a incorporação de agregados reciclados a partir de técnicas de empacotamento de partículas é um assunto pouco explorado, o que evidencia a relevância do tema para o avanço científico na área.

Buscando fazer uma seleção ampliada dos artigos, algumas combinações foram criadas com conjuntos de dois ou mais termos que traduzem uma única definição. Por exemplo, tanto *self compacting concrete* quanto *SCC* foram usados em referência ao concreto autoadensável. Para isso, dois ou mais termos são escritos entre aspas e ligadas pelo operador booleano “OR” dentro de um parêntese. Cada conjunto de dois ou mais termos são ligados pelo conector “AND”.

Para a busca do Eixo 1 de pesquisa, foram retornados muitos artigos com enfoque no assunto de durabilidade de concretos com agregados reciclados. Por ser um assunto que não contempla o escopo da pesquisa, optou-se por incluir o termo (*AND NOT “durability”*) nas buscas a fim de refinar o filtro de busca.

A-3. Definição das combinações de palavras-chave e das bases de dados

O passo 3 do método objetiva a definição absoluta das palavras-chaves, combinações e bases de dados que serão usadas na pesquisa de artigos que irão compor o portfólio bibliográfico.

Note que ambos os eixos descritos no passo 2 têm como variável em comum o uso de agregados reciclados na dosagem do concreto. Portanto, optou-se por subdividir cada eixo

de pesquisa em dois tópicos, sendo os agregados reciclados um termo facultativo na busca. Originou-se, assim, um total de três combinações de palavras-chaves:

Eixo 1: Efeitos da incorporação de ARC nas propriedades de CAA no estado fresco e endurecido.

- Combinação 1: (“self-compacting concrete”) AND (“recycled aggregates”) AND NOT (“durability”)

Eixo 2: Abordagem dos conceitos de empacotamento de partículas na dosagem de composições de CAA e concretos com agregados de RCD.

- Combinação 2A: (“packing density” OR “particle packing”) AND (“self-compacting concrete” OR “SCC”);
- Combinação 2B: (“packing density” OR “particle packing”) AND (“recycled aggregates”).

A-4. Pesquisa final nas bases de dados

Com as três combinações de palavras-chaves definidas, o passo 4 se destinou ao processamento das buscas nas bases de dados para coletar os artigos retornados. Cada combinação foi pesquisada individualmente nas três bases de dados, resultando um total de nove buscas.

Em nenhuma das buscas foi aplicado filtro temporal para limitar o período de publicação dos artigos. Isso evita a exclusão de publicações que sejam mais antigas, porém de grande relevância para o tema. Demais filtros como área de conhecimento do artigo e tipo de documento (artigo publicado em periódico ou em evento científico) também não foram aplicados. Os resultados retornados na pesquisa das três combinações são apresentados na tabela 1.

Tabela A4.1 – Resultados de pesquisa das combinações de palavras-chaves nas bases de dados.

PALAVRAS-CHAVES E COMBINAÇÕES		NÚMERO DE RESULTADOS POR BASE DE DADOS			TOTAL
		SCIENCE DIRECT	SCOPUS	WEB OF SCIENCE	
1	Title, abstract, keywords: ("self compacting concrete") AND ("recycled aggregates") AND NOT ("durability")	35	124	48	207
2A	Title, abstract, keywords: ("packing density" OR "particle packing") AND ("self compacting concrete" OR "SCC")	33	71	108	212
2B	Title, abstract or author-specified keywords: ("particle packing" OR "packing density") AND ("recycled aggregates")	8	23	5	36

Data da pesquisa nas bases de dados: 06/02/2020

Fonte: O Autor (2020)

Concluído cada processo de busca, as listas de artigos foram exportadas das bases de dados no formato “bibtex” e importadas para o software Mendeley desktop (versão 1.19.4) a fim de executar o gerenciamento dos artigos. O formato bibtex facilita o processo de gerenciamento, pois converte a lista de artigos em um ficheiro que contém os dados sintetizados de cada artigo (título, autores, resumo, palavras-chaves, periódico/congresso no qual foi publicado e ano de publicação). Quando importados para o software, os arquivos foram separados em pastas individuais conforme cada combinação.

Especificamente em relação à combinação 2B, nota-se que o número de artigos retornados é relativamente baixo, comparado aos resultados das outras combinações, o que indica que a aplicação de técnicas de empacotamento de partículas em concretos com agregados reciclados é um tema pouco explorado na literatura. Inclusive, ao exportar os arquivos para o Mendeley, se observou que 80% desses artigos são recentes, publicados entre 2015-2020.

A-5. Filtragem dos artigos selecionados

O passo 5 compreendeu a filtragem dos artigos a partir de uma análise dos títulos, resumos e palavras-chaves executada no gerenciador de referências Mendeley.

Antes de iniciar o processo de filtragem, foi executado o procedimento de exclusão de artigos em duplicata, pois, no processo de busca nas bases de dados, alguns artigos são exportados repetidamente de mais de uma base. O Mendeley também foi empregado nesse procedimento, utilizando uma ferramenta que identifica e remove artigos repetidos.

De acordo com o Methodi Ordinatio, nesta etapa alguns critérios baseados no julgamento pessoal do pesquisador devem ser admitidos para eliminar artigos que não sejam relevantes para a pesquisa.

Seguindo essa orientação, foram excluídos da biblioteca eletrônica arquivos com os seguintes conteúdos: capítulos de livros; artigos publicados em conferências; artigos com enfoque no dimensionamento e análises estruturais ou concreto reforçado com fibras. Para o eixo 1 da pesquisa, foram mantidos exclusivamente os artigos cujo estudo experimental foi desenvolvido com agregados reciclados de origem de RCD, ou seja, artigos que tratam de agregados reciclados derivados de outros tipos resíduos foram excluídos. Artigos que se repetiam em mais de uma busca foram mantidos somente em uma das combinações. Artigos que somente mencionavam as palavras-chaves da busca de maneira aleatória, porém sem dar enfoque no assunto, também foram descartados da seleção.

O número resultante de artigos para cada combinação após o processo de exclusão de artigos em duplicata e filtragem é apresentado na tabela 2.

Tabela A4.2 – Número de artigos de cada combinação após filtragem e remoção de duplicatas

PALAVRAS-CHAVES E COMBINAÇÕES		Total	Duplicados	Removidos	Restante
1	Title, abstract, keywords: ("self compacting concrete") AND ("recycled aggregates") AND NOT ("durability")	207	33	109	65
2A	Title, abstract, keywords: ("packing density" OR "particle packing") AND ("self compacting concrete" OR "SCC")	212	80	88	44
2B	Title, abstract or author-specified keywords: ("particle packing" OR "packing density") AND ("recycled aggregates")	36	15	9	12

Fonte: Autor (2020)

Após o procedimento de filtragem, a biblioteca de artigos de cada pasta foi importada para um novo software gerenciador, JabRef (versão 4.3.1). Esse software foi utilizado exclusivamente para gerar as listas de artigos em formato de tabela e exportá-la para o Excel. As tabelas contêm o título do artigo, os autores, o periódico onde foi publicado e o ano de publicação.

A-6. Critérios de classificação dos artigos

Após exportar a lista de artigos de cada combinação para o Excel, o passo 6 consistiu na identificação dos três critérios que governam a classificação dos trabalhos: fator de impacto do periódico, ano de publicação do artigo e o número de citações.

A métrica escolhida para quantificar o fator de impacto do periódico foi o fator de impacto de 5 anos (JCR), pois, de acordo com os autores do *Methodi Ordinatio*, é a que melhor representa a avaliação do periódico. O número de citações atribuído para cada artigo foi identificado a partir de pesquisa na base do Google Acadêmico.

A.7- Cálculo do fator *InOrdinatio*

Depois de completar as tabelas com o fator de impacto e o número de citações de cada artigo, no passo 7 a Equação 1 foi aplicada para calcular o fator *InOrdinatio*.

$$\text{InOrdinatio} = \text{IF} + \alpha * \left[10 - (\text{Ano recente} - \text{Ano de publicação}) + \sum \text{Ci} \right]$$

Na equação, *IF* é o fator de impacto do periódico; α é um fator atribuído pelo próprio pesquisador para definir a relevância do ano de publicação do artigo e pode variar de 1-10; e *Ci* é o número de vezes em que o artigo foi citado na literatura.

Como os assuntos que envolvem o tema de estudo são razoavelmente novos, porém são abordados na literatura há mais de uma década, atribuiu-se valor 5 ao fator α , buscando uma ponderação entre os dois aspectos.

Finalmente, o *ranking* dos trabalhos científicos foi obtido a partir da classificação numérica dos artigos, conforme o fator *InOrdinatio*, em ordem decrescente. Em seguida, a partir do *ranking* resultante de cada combinação, foram estabelecidos critérios individuais para selecionar quais e quantos artigos iriam compor portfólio bibliográfico.

Para as combinações 1 e 2A foram selecionados todos os artigos com *InOrdinatio* acima de 50. A combinação 2B constituiu uma pesquisa mais restritiva e resultou em somente 12 artigos, portanto, todos foram mantidos. Ao final, se obteve um portfólio bibliográfico com 64 artigos distribuídos da seguinte maneira: 31 artigos da combinação 1, 21 artigos da combinação 2A e 12 artigos da combinação 2B. A lista de artigos que compôs o portfólio se encontra no Apêndice 1 deste trabalho.

Algumas publicações científicas que integram a abordagem do estudo não estão indexadas nas bases de dados usadas no processo de busca. Portanto, alguns artigos que não integram o portfólio bibliográfico, mas que se destacam na literatura, também foram incluídos na revisão bibliográfica deste trabalho.

Em acréscimo, outros trabalhos também foram integrados à leitura, incluindo artigos secundários referenciados nos demais artigos lidos, trabalhos acadêmicos de especialização (dissertações e teses) e livros.

A.8- Download dos artigos

O passo 8 se destinou a buscar as versões completas dos artigos e efetuar o download dos documentos para proceder à leitura. Por ser um processo que demanda mais tempo, o download dos artigos foi executado gradualmente no decorrer da fase de leitura.

A.9- Leitura sistemática

Finalmente, o passo 9 se destinou à leitura e análise sistemática dos artigos selecionados. Conforme sugerido pelos autores do *Methodi Ordinatio*, durante a leitura de cada artigo é interessante identificar dados relevantes para o trabalho, como variáveis do estudo, metodologias propostas, resultados alcançados e lacunas de pesquisa.

Dentro do contexto da pesquisa, julgou-se relevante identificar e registrar os seguintes elementos de cada artigo: técnicas de empacotamento de partículas adotadas, materiais empregados nas dosagens, consumo de ARC e de cimento, ensaios e testes executados para caracterização dos materiais e dos concretos, resultados significativos, lacunas de pesquisa, além de sugestões dos autores a respeito de métodos alternativos de ensaio e fatores de dosagem específicos.

APÊNDICE B – PORTFÓLIO DE ARTIGOS

B.1 – Portfólio de artigos da Combinação 1

("self compacting concrete") AND ("recycled aggregates") AND NOT ("durability")

Ordem	Autores	Título	Ano	Journal	JCR	Nº Citações	InOrdinatio
1	Grdic, Z., Toplicic-Curcic, G., Despotovic, I. and Ristic, N.	Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate	2010	Construction and Building Materials	4,046	187	191,05
2	Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D. and Muselin, G.	Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules	2018	Journal of Cleaner Production	6,395	80	126,40
3	Corinaldesi, V. and Moriconi, G.	The role of industrial by-products in self-compacting concrete	2011	Construction and Building Materials	4,046	113	122,05
4	Carro-López, D., González-Fonteboa, B., De Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I. and Silva, P.	Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates	2015	Construction and Building Materials	4,046	73	102,05
5	Uygunoglu, T., Topcu, I.B. and Celik, A.G.	Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability	2014	Journal of Cleaner Production	6,395	75	101,40
6	Güneyisi, E., Gesoglu, M., Algin, Z. and Yazici, H.	Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates	2016	Construction and Building Materials	4,046	64	98,05
7	Gesoglu, M., Güneyisi, E., Öz, H., Taha, I. and Yasemin, M.	Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates	2015	Construction and Building Materials	4,046	58	87,05
8	Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z. and Yazici, H.	Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates	2014	Construction and Building Materials	4,046	62	86,05
9	Silva, Y., Robayo, R., Matthey, P. and Delvasto, S.	Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and	2016	Construction and Building Materials	4,046	38	72,05

		recycled concrete							
10	Kebaili, O., Mouret, M., Arabi, N. and Cassagnabere, F.	Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example	2015	Journal of Cleaner Production	6,395	40		71,40	
11	Silva, R.V., de Brito, J. and Dhir, R.K.	Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review	2018	Construction and Building Materials	4,046	26		70,05	
12	Rajhans, P., Panda, S. and Nayak, S.	Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ	2018	Construction and Building Materials	4,046	23		67,05	
13	Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V. and Manso, J.	The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete	2018	Construction and Building Materials	4,046	21		65,05	
14	González-Taboada, I., González-Fontebo, B., Martínez-Abella, F. and Seara-Paz, S.	Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates	2017	Construction and Building Materials	4,046	22		61,05	
15	González-Taboada, I., González-Fontebo, B., Eiras-López, J. and Rojo-López, G.	Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology	2017	Journal of Cleaner Production	6,395	19		60,40	
16	Salesa, A., Angel Perez-Benedicto, J., Mariano Esteban, L., Vicente-Vas, R. and Orna-CAMRona, M.	Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects	2017	Construction and Building Materials	4,046	20		59,05	
17	Singh, N., Mithulraj, M and Arya, S.	Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin	2019	Resources, Conservation and Recycling		14		59,00	
18	Abed, M., Nemes, R. and Tayeh, B.	Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate	2020	Journal of King Saud University - Engineering Sciences		8		58,00	
19	Nili, M., Sasanipour, H. and Aslani, F.	The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete	2019	Materials	2,972	10		57,97	
20	Singh, R. and Singh, B.	Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates	2018	Construction and Building Materials	4,046	13		57,05	

21	Omrane, M. and Rabehi, M.	Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete	2020	Construction and Building Materials	4,046	0	54,05
22	Rajhans, P., Chand, G., Kisku, N., Panda, S. and Nayak, S.	Proposed mix design method for producing sustainable self compacting heat cured recycled aggregate concrete and its microstructural investigation	2019	Construction and Building Materials	4,046	5	54,05
23	Martinez-Garcia, R., Ignacio Guerra-Romero, M., Moran-del Pozo, J.M., de Brito, J. and Juan-Valdes, A.	Recycling Aggregates for Self-Compacting Concrete Production: A Feasible Option	2020	Materials	2,972	1	53,97
24	González-Taboada, I., González-Fonleboa, B., Pérez-Ordóñez, J. and Eiras-López, J.	Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience	2017	Construction and Building Materials	4,046	14	53,05
25	González-Taboada, I., González-Fonleboa, B., Martínez-Abella, F. and Carro-López, D.	Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box	2017	Construction and Building Materials	4,046	14	53,05
26	Bahrami, N., Zohrabi, M., Mahmoudy, S.A. and Akbari, M.	Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties	2020	Journal of Building Engineering	2,378	0	52,38
27	Mohammed, S.I. and Najim, K.B.	Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete	2020	Structures		2	52,00
28	Gupta, P., Rajhans, P., Panda, S., Nayak, S. and Das, S.	Mix Design Method for Self-Compacting Recycled Aggregate Concrete and Its Microstructural Investigation by Considering Adhered Mortar in Aggregate	2020	Journal of Materials in Civil Engineering	1,984	0	51,98
29	González-Taboada, I., González-Fonleboa, B., Martínez-Abella, F. and Seara-Paz, S.	Self-consolidating recycled concrete: Rheological behavior over time	2020	ACI Materials Journal	1,453	0	51,45
30	Krishnan, G. and Subhash, G.	Effect of GGBS on Self-compacting Recycled Aggregate Concrete	2020	Lecture Notes in Civil Engineering		0	50,00
31	Amrutha Balan, M. and Abin Thomas, C.	Experimental Study and Optimisation of Best Performance Self Compacting Recycled Aggregate Concrete	2020	Lecture Notes in Civil Engineering		0	50,00

32	Singh, R., Singh, B. and Kumar, N.	Thixotropy of self-compacting concrete containing recycled aggregates	2019	Magazine of Concrete Research	2,206	2	49,21
33	Barroqueiro, T., da Silva, P. and de Brito, J.	Fresh-state and mechanical properties of high-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry	2019	Materials	2,972	1	48,97
34	González-Taboada, I., González-Fonleboa, B., Martínez-Abella, F. and Seara-Paz, S.	Evaluation of self-compacting recycled concrete robustness by statistical approach	2018	Construction and Building Materials	4,046	4	48,05
35	Tang, W., Khavarian, M., Yousefi, A., Chan, R. and Cui, H.	Influence of surface treatment of recycled aggregates on mechanical properties and bond strength of self-compacting concrete	2019	Sustainability (Switzerland)		3	48,00
36	Singh, A., Arora, S., ShAMRa, V. and Bhardwaj, B.	Workability Retention and Strength Development of Self-Compacting Recycled Aggregate Concrete Using Ultrafine Recycled Powders and Silica Fume	2019	Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste		3	48,00
37	Santos, S., da Silva, P. and de Brito, J.	Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry	2017	Materials	2,972	10	47,97
38	Djelloul, O., Menadi, B., Wardeh, G. and Kenai, S.	Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag	2018	Advances in Concrete Construction	2,618	5	47,62
39	Senthamilselvi, R. and Revathi, P.	Influence of blended cement on the fresh properties of self-compacting concrete incorporating recycled aggregate	2019	Lecture Notes in Civil Engineering		1	46,00
40	Singh, N., Arya, S. and Raj, M.M.	Assessing the Performance of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Concrete Aggregates and Coal Bottom Ash Using Ultrasonic Pulse Velocity	2019	RECYCLED WASTE MATERIALS, EGRWSE 2018, pp. {169-178}			45,00
41	Singh, A., Duan, Z., Xiao, J. and Liu, Q.	Incorporating recycled aggregates in self-compacting concrete: a review	2019	Journal of Sustainable Cement-Based Materials		0	45,00
42	Younis, K. and Latif, S.	Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating recycled aggregate: A review	2019	International Journal of Scientific and Technology Research		0	45,00
43	Larsen, O., Naruts, V. and Aleksandrova, O.	Self-compacting concrete with recycled aggregates	2019	Materials Today: Proceedings			45,00

44	Nirmala, S., Sashidhar, C. and Reddy, V.	Self-compacting concrete with recycled coarse aggregate and manufactured sand	2019	International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering	0	45,00
45	Ismail, I., Jamaluddin, N. and Shahidan, S.	A review on performance of waste materials in self compacting concrete (SCC)	2016	Jurnal Teknologi	14	44,00
46	Carro-López, D., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., [de Brito], J. and Varela-Puga, F.	Proportioning, Microstructure and Fresh Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Sand	2017	Procedia Engineering	9	44,00
47	Singh, R., Kumar, N. and Singh, B.	Effect of supplementary cementitious materials on rheology of different grades of self-compacting concrete made with recycled aggregates	2017	Journal of Advanced Concrete Technology	1,336	42,34
48	Carro-Lopez, D., Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., Gonzalez-Taboada, I., de Brito, J. and Varela-Puga, F.	Proportioning, fresh-state properties and rheology of self-compacting concrete with fine recycled aggregates	2018	HORMIGON Y ACERO	2	42,00
49	Campos, R.S., Barbosa, M.P., Pimentel, L.L. and Maciel, G.d.F.	Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete	2018	MATERIA-RIO DE JANEIRO	1	41,00
50	Campos, R., Barbosa, M., Pimentel, L. and Maciel, G.	Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete [Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável]	2018	Revista Materia	1	41,00
51	Quan, H. and Kasami, H.	Experimental study on the effects of recycled concrete powder on properties of self-compacting concrete	2018	Open Civil Engineering Journal	0	40,00
52	Revathi, P., Selvi, R. and Velin, S.	Investigations on Fresh and Hardened Properties of Recycled Aggregate Self Compacting Concrete	2013	Journal of The Institution of Engineers (India): Series A	23	38,00
53	Wang, H. and Zhang, N.	Assessment of treated recycled concrete aggregates on the properties of recycled-aggregate-self-compacting concrete	2016	Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology	4	34,00

54	Milošević, B., Petrović, Ž., Mijalković, M. and Ranković, S.	Mechanical characteristics of self-compacting concrete made with coarse aggregate obtained from concrete prefabricated elements recycling [Caracteristici mecanice ale betoanelor auto – Compactante preparate cu agregate grosiere obtinute prin reciclarea elementelor de beton prefabricat	2016	Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials	3	33,00
55	Khařaga, S.	Production of high strength self compacting concrete using recycled concrete as fine and/or coarse aggregates	2014	World Applied Sciences Journal	10	30,00
56	Said, K., Belkaem, M., Amina, D. and El-Hadj, K.	Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolana on rheology of self-compacting concrete	2014	Key Engineering Materials	7	27,00
57	Despotovic, I.	Properties of self-compacting concrete made of recycled aggregates and various mineral additives	2015	Gradevnski materijali i konstrukcije-building materials and structures	0	25,00
58	Seethapathi, M., Senthilkumar, S. and Chinnaraju, K.	Experimental study on high performance selfcompacting concrete using recycled aggregate	2014	Journal of Theoretical and Applied Information Technology	4	24,00
59	Pereira-de Oliveira, L., Nepomuceno, M. and Rangel, M.	An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates	2013	Informes de la Construccion	6	21,31
60	Yu, J., Gong, J., Zou, J. and Yang, W.	Study on properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate	2014	Applied Mechanics and Materials	0	20,00
61	Tang, W.	Fresh properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate	2013	Advanced Materials Research	3	18,00
62	Li, J., Qu, X., Chen, H., Li, J. and Jiang, L.	Experimental research on mechanical performance of self-compacting reinforced concrete beam with recycled coarse aggregates	2012	Advanced Materials Research	4	14,00
63	Yuan, Y., Takao, U. and Yu, C.	SCC produced with recycled concrete aggregates	2012	Advanced Materials Research	4	14,00
64	Jagannatha Rao, K., Bhikshma, V. and Rajesh, P.	Flexural behavior of reinforced self-compacting concrete beams with recycled aggregate	2012	Journal of Structural Engineering (India)	2,528	12,53
65	Li, J., Wang, L., Li, J., Qu, X. and Jang, L.	Research on flexural behavior of coarse recycled aggregate-filled plain concrete beam	2011	Advanced Materials Research	1	6,00

B.2 – Portfólio de artigos da Combinação 2A

("packing density" OR "particle packing") AND ("self compacting concrete" OR "SCC")

Ordem	Autores	Título do artigo	Ano	Journal	JCR	Nº Citações	InOrdinatio
1	Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.	Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand	2011	Cement and Concrete Composites	5,172	100	110,17
2	Kanadasan, J. and Razak, H.A.	Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing	2014	Materials & Design (1980-2015)	5,77	70	95,77
3	Li, L.G. and Kwan, A.K.H.	Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness	2013	Cement and Concrete Composites	5,172	72	92,17
4	Kanadasan, J. and Razak, H.A.	Engineering and sustainability performance of self-compacting palm oil mill incinerated waste concrete	2015	Journal of Cleaner Production	6,395	56	87,40
5	Geiker, M.R., Brandl, M., Thrane, L.N. and Nielsen, L.F.	On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete	2002	Cement, Concrete and Aggregates	0,00	121	81,00
6	Ghoddousi, P., Javid, A.A.S. and Sobhani, J.	Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures	2014	Construction and Building Materials	4,046	45	69,05
7	Mehdipour, I. and Khayat, K.H.	Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review	2018	Construction and Building Materials	4,046	25	69,05
8	Wang, X., Wang, K., Taylor, P. and Morcous, G.	Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method	2014	Construction and Building Materials	4,046	39	63,05
9	Long, W.-J., Gu, Y., Liao, J. and Xing, F.	Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete	2017	Journal of Cleaner Production	6,395	18	59,40
10	Sebaibi, N., Benzerzour, M., Sebaibi, Y. and Abriak, N.-E.	Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard	2013	Construction and Building Materials	4,046	40	59,05
11	Pelisser, F., Vieira, A. and Bernardin, A.M.	Efficient self-compacting concrete with low cement consumption	2018	Journal of Cleaner Production	6,395	12	58,40

12	Mueller, F.V., Wallevik, O.H. and Khayat, K.H.	Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance	2014	Cement and Concrete Composites	5,172	32	57,17
13	Li, P., Zhang, T., An, X. and Zhang, J.	An enhanced mix design method of self-compacting concrete with fly ash content based on paste rheological threshold theory and material packing characteristics	2020	Construction and Building Materials	4,046	0	54,05
14	Zuo, W., Liu, J., Tian, Q., Xu, W., She, W., Feng, P. and Miao, C.	Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories	2018	Construction and Building Materials	4,046	10	54,05
15	Ashish, D.K. and Verma, S.K.	An overview on mixture design of self-compacting concrete	2019	Structural Concrete	1,885	7	53,89
16	Sun, Y., Wang, Z., Gao, Q. and Liu, C.	A new mixture design methodology based on the Packing Density Theory for high performance concrete in bridge engineering	2018	Construction and Building Materials	4,046	9	53,05
17	De Grazia, M.T., Sanchez, L.F.M., Romano, R. and Pileggi, R.	Evaluation of the fresh and hardened state properties of low cement content systems	2020	Magazine of Concrete Research	2,026	0	52,03
18	Mehdipour, I. and Khayat, K.H.	Elucidating how particle packing controls rheology and strength development of dense cementitious suspensions	2019	Cement and Concrete Composites	5,172	0	50,17
19	Ashish, D.K. and Verma, S.K.	Determination of optimum mixture design method for self-compacting concrete: Validation of method with experimental results	2019	Construction and Building Materials	4,046	1	50,05
20	Yousuf, S., Sanchez, L.F.M. and Shammeh, S.A.	The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry	2019	Journal of building engineering	2,378	3	50,38
21	Gil, A.M., Khayat, K.H. and Tutikian, B.F.	An experimental approach to design self-consolidating concrete	2019	Construction and Building Materials	4,046	1	50,05
22	Abutaha, F., Razak, H.A., Ibrahim, H.A. and Ghayeb, H.H.	Adopting particle-packing method to develop high strength palm oil clinker concrete	2018	Resources, Conservation and Recycling		7	47,00
23	Diederich, P., Mouret, M. and Ponchon, F.	Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler	2013	Construction and Building Materials	4,046	26	45,05
24	Pannem, R. And Kumar, P.P.	Comparative study of self-compacting concrete containing lightweight and normal aggregates	2019	Slovak journal of civil engineering	0,00	0	45,00

25	Raj, S., Bharatkumar, B.H. and Kumar, V.R.	Implications of uncompacted packing density of aggregates in self-compacting concrete mix proportioning	2018	Magazine of Concrete Research	2,026	1	43,03
26	Kabagire, K.D., Diederich, P., Yahia, A. and Chekired, M.	Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar	2017	Construction and Building Materials	4,046	3	42,05
27	Kounakoff, B.A., Hanzic, L. and Ho, J.C.M.	Limestone and silica fume to improve concurrent flowability-segregation limits of concrete	2017	Magazine of Concrete Research	2,026	5	42,03
28	Soliman, N.A. and Tagnit-Hamou, A.	Using Particle Packing and Statistical Approach to Optimize Eco-Efficient Ultra-High-Performance Concrete	2017	ACI Materials Journal	1,453	5	41,45
29	Farokhzad, R., Mahdikhani, M., Bagheri, A. and Baghdadi, J.	Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete	2016	Construction and Building Materials	4,046	7	41,05
30	Klein, N.S., Cavalaro, S., Aguado, A., Segura, I. and Toralles, B.	The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation	2016	Construction and Building Materials	4,046	6	40,05
31	Nimodiya, P.N. and Patel, H.S.	Effect of packing density on properties of self compacting concrete	2018	International Journal of Civil Engineering and Technology	0,00	0	40,00
32	Chand, M.S.R., Radhika, K.L., Kumar, P.R. and Rakesh, S.	Mix model for self-compacting concrete with recycled aggregate	2017	Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings	0,00	3	38,00
33	Kumar, P.P. and Rama Mohan Rao, P.	Packing density of self compacting concrete using normal and lightweight aggregates	2017	International Journal of Civil Engineering and Technology	0,00	3	38,00
34	Sameer, S.K., Chakravarti, B.J. and Ramesh, V.	A quantitative approach in designing self compacting concrete using compressible packing model	2017	Indian Concrete Journal	0,00	1	36,00
35	Chand, M.S.R., Ratna, P.S.N., Radhika, K.L., Kumar, P.R. and Yedukondalu, C.	Optimization of mix proportioning for self compacting concretes using particle packing theories	2017	Indian Concrete Journal	0,00	1	36,00
36	Chaubey, A.	Advantage of particle packing model in designing self compacting concretes	2017	Indian Concrete Journal	0,00	0	35,00
37	Bucher, R., Diederich, P., Mouret, M., Escadeillas, G. and	Self-compacting concrete using flash-metakaolin: design method	2015	Materials and Structures/Materiaux et	2,548	4	31,55

	Cyr, M.								
38	Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.	An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete	2012	Constructions	2,548	17		29,55	
39	Basheerudeen, A. and Sivakumar, A.	Particle packing approach for designing the mortar phase of self compacting concrete	2014	Engineering Journal	0,00	9		29,00	
40	He, H., Stroeven, P., Stroeven, M. and Sluys, L.J.	Optimization of particle packing by analytical and computer simulation approaches	2012	Computers and Concrete	1,889	3		14,89	
41	Radhika, K.L., Kumar, P.R., Rao, S.V., Rao, M.V.K. and Manikanta, K.	Mix design methodology for fibrous self compacting concrete based on compressible packing model (CPM)	2012	Cement Wapno Beton	0,476	3		13,48	
42	Shen, J., Yurtdas, I., Diagana, C. and Li, A.	Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry	2009	Canadian Journal of Civil Engineering	0,742	8		3,74	
43	Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.	A new approach to optimisation of paste composition in self-compacting concrete	2008	Indian Concrete Journal	0,00	3		-7,00	
44	Stark, U. and Mueller, A.	The influence of particle shape and particle size on the work-ability properties of SCC mortars	2007	ZKG International	0,101	4		-10,90	

B.3 – Portfólio de artigos da Combinação 2B

("packing density" OR "particle packing") AND ("recycled aggregates")

Ordem	Autores	Título do artigo	Ano	Journal	JCR	Nº Citações	InOrdinatio
1	Yehia, S., Helal, K., Abusharkh, A., Zaher, A. and Istaitiyeh, H.	Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete	2015	International Journal of Concrete Structures and Materials	2,111	82	109,11
2	Li, L.G., Lin, C.J., Chen, G.M., Kwan, A.K.H. and Jiang, T.	Effects of packing on compressive behaviour of recycled aggregate concrete	2017	Construction and Building Materials	4,046	24	63,05
3	Pradhan, S., Kumar, S. and Barai, S.V.	Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach	2017	Construction and Building Materials	4,046	23	62,05

4	Pradhan, S., Kumar, S. and Barai, S.V.	Multi-scale characterisation of recycled aggregate concrete and prediction of its performance	2020	Cement and Concrete Composites	5,172	0	55,17
5	Sunayana, S. and Barai, S.V.	Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method	2017	Construction and Building Materials	4,046	16	55,05
6	Pradhan, S., Tiwari, B.R., Kumar, S. and Barai, S.V.	Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix	2019	Journal of Cleaner Production	6,395	2	53,40
7	Pradhan, S., Kumar, S. and Barai, S.V.	Impact of particle packing mix design method on fracture properties of natural and recycled aggregate concrete	2019	Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures	2,555	2	49,56
8	Sunayana, S. and Barai, S.V.	Influence of particle packing method on sustainable concrete using fly ash and recycled aggregates	2019	Lecture Notes in Civil Engineering	0,00	0	45,00
9	Mwasha, A. and Ramnath, R.	Manufacturing concrete with high compressive strength using recycled aggregates	2018	Journal of Materials in Civil Engineering	1,984	2	43,98
10	Yan, H., Wu, S. and Gui, M.	Maximum packing density of recycled coarse aggregate and its effects on properties of concrete	2015	Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials	0,00	2	27,00
11	Richardson, A., Allain, P. and Veuille, M.	Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement	2010	Structural Survey	0,00	21	21,00
12	Li, J.-S., Xiao, H.-N. and Gong, J.-Q.	Laboratory research on grading optimization of recycled aggregate concrete	2008	Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials	0,00	2	-8,00

APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

C.1 – Resistência à Compressão dos Concretos na Idade de 28 dias

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)
01	14,31		30,46		17,09	17,09
02	20,44		36,67		22,25	
03	17,59	17,59	32,77	32,77	19,27	19,27
04	17,18	17,18	32,04	32,04	14,21	
Média (MPa)	17,38		32,99		18,20	
Desvio Padrão (MPa)	1,941		2,044		2,635	
Limite Inferior (MPa)	15,48		30,98		15,62	
Limite Superior (MPa)	19,28		34,99		20,78	
Média Final (MPa)	17,38		32,41		18,18	

C.2 – Resistência à Compressão dos Concretos na Idade de 90 dias

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)
01	17,06		24,42		23,88	23,88
02	19,21	19,21	37,31	37,31	25,61	25,61
03	22,55		47,95		27,00	
04	19,50	19,50	27,04		19,72	
05	20,19	20,19	36,74	36,74	21,71	21,71
Média (MPa)	19,70		34,69		23,58	
Desvio Padrão (MPa)	1,768		8,379		2,620	
Limite Inferior (MPa)	18,15		27,35		21,29	
Limite Superior (MPa)	21,25		42,04		25,88	
Média Final (MPa)	19,63		37,02		23,73	

C.3 – TESTE ANOVA – Resistência à compressão (idades de 28 e 90 dias)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre idades	51,400	1,000	51,400	112,873	4,10E-05	5,987
Entre traços	610,546	2,000	305,27	670,37	8,84E-08	5,143
Interações	5,798	2,000	2,899	6,366	3,29E-02	5,143
Dentro	2,732	6,000	0,455			
Total	670,476	11,00				

Entre idades: $F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre as idades

Entre traços: $F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.4 – TESTE TUKEY: Resistência à compressão (idade de 28 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	0,46					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	17,38	CAA-1 e CAA-2	15,02	Rejeita H_0
n° de repetições	2,0	CAA-2	32,41	CAA-1 e CAA-3	0,80	Não Rejeita H_0
graus de liberdade	3,0	CAA-3	18,18	CAA-2 e CAA-3	14,23	Rejeita H_0
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	3,99	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.5 – TESTE TUKEY: Resistência à compressão (idade de 90 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	1,39					
n° de tratamentos	3,00	CAA-1	19,63	CAA-1 e CAA-2	17,39	Rejeita H_0
n° de repetições	3,00	CAA-2	37,02	CAA-1 e CAA-3	4,10	Rejeita H_0
graus de liberdade	6,00	CAA-3	23,73	CAA-2 e CAA-3	13,29	Rejeita H_0
q (tabelado)	4,34	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	2,95	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.6 – Resistência à Tração por Compressão Diametral dos Concretos na Idade de 90 dias

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)	Resultados Brutos (MPa)	Resultados Validados (MPa)
01	2,21	2,21	4,25		2,97	
02	2,10	2,10	4,55		2,60	2,60
03	2,01		4,34	4,34	2,15	
04	2,31		4,31	4,31	2,58	2,58
Média (MPa)	2,16		4,36		2,57	
Desvio Padrão (MPa)	0,11		0,11		0,29	
Limite Inferior (MPa)	2,05		4,25		2,29	
Limite Superior (MPa)	2,27		4,47		2,86	
Média Final (MPa)	2,16		4,33		2,59	

C.7 – TESTE ANOVA: Resistência à tração na compressão diametral (idade de 90 dias)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre traços	5,266	2,000	2,633	1165,605	0,000046	9,552
Dentro	0,007	3,000	0,002			
Total	5,273	5,000				

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.8 – TESTE TUKEY: Resistência à tração na compressão diametral (idade de 90 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	0,002					
n° de tratamentos	3,00	CAA-1	2,16	CAA-1 e CAA-2	2,17	Rejeita H_0
n° de repetições	2,00	CAA-2	4,33	CAA-1 e CAA-3	0,43	Rejeita H_0
graus de liberdade	3,00	CAA-3	2,59	CAA-2 e CAA-3	1,73	Rejeita H_0
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	0,20	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.9 – Módulo de Elasticidade dos Concretos na Idade de 28 dias

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (GPa)	Resultados Validados (GPa)	Resultados Brutos (GPa)	Resultados Validados (GPa)	Resultados Brutos (GPa)	Resultados Validados (GPa)
01	14,95	14,95	30,34	30,34	10,57	
02	16,08	16,08	29,96	29,96	18,82	18,82
03	12,02		33,81		16,74	16,74
04			27,08		22,62	
Média (GPa)	14,35		30,30		17,19	
Desvio Padrão (GPa)	1,71		2,39		4,36	
Limite Inferior (GPa)	12,41		27,96		12,91	
Limite Superior (GPa)	16,29		32,64		21,46	
Média Final (MPa)	15,52		30,15		17,78	

C.10 – Absorção de Água por Imersão

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)
01	10,73	10,73	3,96		9,14	9,14
02	10,43	10,43	4,89	4,89	9,53	
03	11,51		5,25	5,25	8,73	
04	-		-		9,03	9,03
Média (%)	10,89		4,70		9,11	
Desvio Padrão (%)	0,45		0,54		0,29	
Limite Inferior (%)	10,37		4,08		8,83	
Limite Superior (%)	11,40		5,32		9,39	
Média Final (%)	10,58		5,07		9,08	

C.11 – TESTE ANOVA: Absorção de água por imersão (idade de 90 dias)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre traços	0,00325	2,0	0,0016	414,537	0,0002	9,552
Dentro	0,00001	3,0	3,92E-06			
Total						

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.12 – TESTE TUKEY: Absorção de água por imersão (idade de 90 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	3,92E-06					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	0,1058	CAA-1 e CAA-2	0,055	Rejeita H ₀
n° de repetições	2,0	CAA-2	0,0507	CAA-1 e CAA-3	0,015	Rejeita H ₀
graus de liberdade	3,0	CAA-3	0,0908	CAA-2 e CAA-3	0,040	Rejeita H ₀
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	0,008	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.13 – ÍNDICE DE VAZIO DOS CONCRETOS

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)	Resultados Brutos (%)	Resultados Validados (%)
01	19,04	19,04	8,79		17,35	17,35
02	18,83	18,83	10,46	10,46	17,93	
03	20,91		11,26	11,26	17,07	
04	-		-		17,43	17,43
Média (%)	19,59		10,17		17,44	
Desvio Padrão (%)	0,94		1,03		0,31	
Limite Inferior (%)	18,53		9,00		17,14	
Limite Superior (%)	20,65		11,34		17,75	
Média Final (%)	18,93		10,86		17,39	

C.14 – TESTE ANOVA: Índice de Vazios (idade de 90 dias)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F _{cal}	valor-P	F _{tab} (crítico)
Entre traços	0,007342	2,0	0,00367	313,718	0,00033	9,552
Dentro	3,51E-05	3,0	1,2E-05			
Total	0,00738	5,0				

F_{cal} > F_{tab} → há diferença entre os traços

C.15 – TESTE TUKEY: Índice de Vazios (idade de 90 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	1,2E-05					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	0,1893	CAA-1 e CAA-2	0,081	Rejeita H ₀
n° de repetições	2,0	CAA-2	0,1086	CAA-1 e CAA-3	0,015	Rejeita H ₀
graus de liberdade	3,0	CAA-3	0,1739	CAA-2 e CAA-3	0,065	Não Rejeita H ₀
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	0,014	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.16 – MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do Corpo de Prova	CAA-1		CAA-2		CAA-3	
	Resultados Brutos (kg/m ³)	Resultados Validados (kg/m ³)	Resultados Brutos (kg/m ³)	Resultados Validados (kg/m ³)	Resultados Brutos (kg/m ³)	Resultados Validados (kg/m ³)
01	2192,26	2192,26	2434,35		2297,08	2297,08
02	2223,75	2223,75	2390,66	2390,66	2292,73	
03	2298,19		2416,71	2416,71	2356,61	
04	-		-		2337,75	2337,75
Média (kg/m³)	2238,07		2403,69		2321,04	
Desvio Padrão (kg/m³)	44,42		17,94		27,02	
Limite Inferior (kg/m³)	2187,81		2383,38		2294,56	
Limite Superior (kg/m³)	2288,33		2423,99		2347,52	
Média Final (kg/m³)	2208,00		2403,69		2317,41	

C.17 – TESTE ANOVA: Massa Específica (idade de 90 dias)

Fonte da variação	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab} (crítico)
Entre traços	38469,39	2,0	19234,69	34,717	0,008	9,552
Dentro	1662,13	3,0	554,04			
Total	40131,52	5,0				

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.18 – TESTE TUKEY: Massa Específica (idade de 90 dias)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	554,04					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	2208,00	CAA-1 e CAA-2	195,68	Rejeita H ₀
n° de repetições	2,0	CAA-2	2403,69	CAA-1 e CAA-3	109,41	Rejeita H ₀

graus de liberdade	3,0	CAA-3	2317,41	CAA-2 e CAA-3	86,27	Não Rejeita H ₀
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	98,37	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.19 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (CAA-1)

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do corpo de prova	Absorção (g/cm ²)					Ascensão de água (cm)
	3 horas de ensaio	6 horas de ensaio	24 horas de ensaio	48 horas de ensaio	72 horas de ensaio	
01	0,0057	0,0065	0,0092	0,0109	0,0117	3,10
02	0,0057	0,0065	0,0090	0,0105	0,0115	2,30
03	0,0045	0,0051	0,0073	0,0087	0,0095	2,35
Média	0,0053	0,0060	0,0085	0,0100	0,0109	2,58
Desvio Padrão	0,0006	0,0007	0,0009	0,0010	0,0010	0,37
Limite Inferior	0,0046	0,0053	0,0076	0,0089	0,0097	2,17
Limite Superior	0,0059	0,0068	0,0095	0,0111	0,0121	3,00
Média Final	0,0057	0,0065	0,0091	0,0107	0,0116	2,30

C.20 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (CAA-2)

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do corpo de prova	Absorção (g/cm ²)					Ascensão de água (cm)
	3 horas de ensaio	6 horas de ensaio	24 horas de ensaio	48 horas de ensaio	72 horas de ensaio	
01	0,0026	0,0032	0,0049	0,0055	0,0058	15,50
02	0,0025	0,0032	0,0047	0,0052	0,0054	15,60
03	0,0018	0,0022	0,0037	0,0043	0,0047	15,10
Média	0,0023	0,0029	0,0044	0,0050	0,0053	15,40
Desvio Padrão	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,22
Limite Inferior	0,0019	0,0024	0,0038	0,0045	0,0048	15,16
Limite Superior	0,0027	0,0034	0,0051	0,0056	0,0058	15,64
Média Final	0,0026	0,0032	0,0048	0,0053	0,0056	15,55

C.21 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (CAA-3)

Resultados Brutos e Resultados Validados após tratamento estatístico.

ID do corpo de prova	Absorção (g/cm ²)					Ascensão de água (cm)
	3 horas de ensaio	6 horas de ensaio	24 horas de ensaio	48 horas de ensaio	72 horas de ensaio	
01	0,0036	0,0042	0,0062	0,0073	0,0081	2,08
02	0,0037	0,0043	0,0065	0,0078	0,0085	2,20
03	0,0036	0,0043	0,0067	0,0081	0,0088	2,25
04	0,0035	0,0039	0,0060	0,0071	0,0078	2,10
Média	0,0036	0,0042	0,0063	0,0076	0,0083	2,16
Desvio Padrão	0,0001	0,0001	0,0003	0,0004	0,0004	0,07
Limite Inferior	0,0035	0,0040	0,0061	0,0072	0,0079	2,09
Limite Superior	0,0037	0,0043	0,0066	0,0079	0,0087	2,23
Média Final	0,0036	0,0042	0,0063	0,0076	0,0083	2,15

C.22 – TESTE ANOVA: Absorção de água por capilaridade (24 horas de ensaio)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre traços	1,93E-05	2,0	9,6E-06	354,492	0,0003	9,552
Dentro	8,15E-08	3,0	2,7E-08			
Total	1,93E-05	5,0				

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.23 – TESTE TUKEY: Absorção de água por capilaridade (24 horas de ensaio)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR	2,72E-08					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	0,0091	CAA-1 e CAA-2	0,0043	Rejeita H ₀
n° de repetições	2,0	CAA-2	0,0048	CAA-1 e CAA-3	0,0028	Rejeita H ₀
graus de liberdade	3,0	CAA-3	0,0063	CAA-2 e CAA-3	0,0015	Rejeita H ₀
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	6,89E-04	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.24 – TESTE ANOVA: Absorção de água por capilaridade (48 horas de ensaio)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre traços	2,88E-05	2,0	1,4E-05	199,90	0,00064	9,552
Dentro	2,16E-07	3,0	7,2E-08			
Total	2,90E-05	5,0				

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.25 – TESTE TUKEY: Absorção de água por capilaridade (48 horas de ensaio)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR						
QMR	7,21E-08					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	0,0107	CAA-1 e CAA-2	0,0053	Rejeita H_0
n° de repetições	2,0	CAA-2	0,0053	CAA-1 e CAA-3	0,0031	Rejeita H_0
graus de liberdade	3,0	CAA-3	0,0076	CAA-2 e CAA-3	0,0022	Rejeita H_0
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	1,12E-03	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				

C.26 – TESTE ANOVA: Absorção de água por capilaridade (72 horas de ensaio)

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	F_{cal}	valor-P	F_{tab} (crítico)
Entre traços	3,63E-05	2,0	1,82E-05	254,00	0,00045	9,55
Dentro	2,15E-07	3,0	7,15E-08			
Total	3,66E-05	5,0				

$F_{cal} > F_{tab} \rightarrow$ há diferença entre os traços

C.27 – TESTE TUKEY: Absorção de água por capilaridade (72 horas de ensaio)

Parâmetros de cálculo		Traço	Média	Comparação	Diferença entre as médias	Conclusão
QMR						
QMR	7,15E-08					
n° de tratamentos	3,0	CAA-1	0,0116	CAA-1 e CAA-2	0,0060	Rejeita H_0
n° de repetições	2,0	CAA-2	0,0056	CAA-1 e CAA-3	0,0033	Rejeita H_0
graus de liberdade	3,0	CAA-3	0,0083	CAA-2 e CAA-3	0,0027	Rejeita H_0
q (tabelado)	5,91	H ₀ : hipótese nula, quando não há diferença entre as médias (diferença entre as médias < dms)				
dms	1,12E-03	H ₁ : hipótese alternativa, quando há diferença entre as médias (diferença entre as médias > dms)				