



**TRATAMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO PARA
PRODUÇÃO DE CONCRETO COM FUNÇÃO ESTRUTURAL**

ÉRICA SILVA DA NÓBREGA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**TRATAMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO PARA
PRODUÇÃO DE CONCRETO COM FUNÇÃO ESTRUTURAL**

ÉERICA SILVA DA NÓBREGA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**TRATAMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO PARA
PRODUÇÃO DE CONCRETO COM FUNÇÃO ESTRUTURAL**

ÉERICA SILVA DA NÓBREGA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

Aprovado por:

Valdirene Maria Silva Capuzzo

(Orientadora)

Rodrigo de Melo Lameiras

(Examinador interno)

Mônica Batista Leite

(Examinador externo)

Brasília, 29 de junho de 2022.

NÓBREGA, ÉRICA SILVA DA

Tratamento de agregado reciclado de concreto para produção de concreto com função estrutural [Distrito Federal] 2022.

xxii, 97 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2022).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Agregado reciclado de concreto
3. Metacaulim

2. Durabilidade
4. Nanosílica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NÓBREGA, E. S. (2022). Tratamento de agregado reciclado de concreto para produção de concreto com função estrutural. Publicação E.DM – 06A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Érica Silva da Nóbrega

TÍTULO: Tratamento de agregado reciclado de concreto para produção de concreto com função estrutural.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Érica Silva da Nóbrega

Quadra 05, lote 31, apartamento 201, setor Norte, Brazlândia, Brasília-DF – Brasil –
CEP:72705-050

E-mail: nobregaerica@gmail.com

Dedico esse trabalho à minha família, que foram fonte de apoio e amor incondicional durante minha trajetória, independente da situação. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, por ter me dado a oportunidade de viver e de voltar a viver, por ser meu pilar e força em cada pedaço da minha trajetória, bendito seja por tão grande amor e misericórdia.

Aos meus pais, Marcos e Sonia, e às minhas irmãs Camila e Fernanda, que em nenhum momento soltaram minha mão, agradeço o apoio, amor e dedicação de vocês para que eu seja quem sou hoje. Não há palavras capazes de descrever o quanto vos amo.

À minha orientadora Valdirene, por sua orientação excepcional, por todo suporte, dedicação e paciência ao longo dessa jornada. Por se fazer não somente uma professora qualquer, mas um dos seres humanos mais incríveis que tive oportunidade de conhecer.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília – PECC/UnB, em especial Professor Elton Bauer, Professora Eugênia, Professor João Henrique e Professor Cláudio. Obrigado por todo conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas de jornada na UnB, Amanda, Augusto, Carla, Jéssica, Juliana, Ana Luiza, Larissa, Karoline, Mara, Javier, Yuri, Izabel, Guilherme, Jaime, Wilson, Nathaly, Nairo, Carlos, Maria Paz, Daniela, Julian, Patrícia, Laysses, John, Matheus Galvão, Wilber, Myrelle, Iago, Jayme, Arthur, Ana Carla, Matheus Nunes. Entre trabalhos e cafés, com vocês os dias ficaram mais leves.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), Gabriel, Patrícia, Severo e Élcio, por toda a ajuda, disposição e amizade.

Agradeço aos funcionários do SG-12 Mainha, Rosinha, Lais e Isa por todo suporte dado no dia a dia, pelas palavras amigas, e claro, pelas risadas.

Ao Fornecedor de Areia Bela Vista por ter fornecido o Agregado Reciclado de Concreto, à Metacaulim do Brasil por ter fornecido o metacaulim e à REC transportes por ter transportado o metacaulim para Brasília gratuitamente, à BASF pela doação do aditivo superplastificante, à Nouryon pela doação da nanosílica e ao GrupoTecno Sistemas Construtivos pela doação dos agregados graúdos.

À Universidade de Brasília – UnB, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal/FAP-DF (Processo 0193.001700/2017), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio físico e financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos que participaram dessa jornada, mesmo que não me lembre dos nomes, que tenham participado direta ou indiretamente, toda minha gratidão a vocês.

“me levanto
sobre o sacrifício
de um milhão de mulheres que vieram antes de mim
pensando
o que posso fazer
para tornar essa montanha mais alta
para que as mulheres que vierem depois de mim
possam ver mais longe

- legado”

Rupi Kaur

RESUMO

TRATAMENTO DE AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO COM FUNÇÃO ESTRUTURAL

Autora: Érica Silva da Nóbrega

Orientadora: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília

Brasília, junho de 2022

Com o aumento da exploração de matéria-prima pela construção civil, há a uma grande geração de resíduos de construção civil (RCC) que necessitam de destinação alternativa além do descarte. Surge assim a ideia do reaproveitamento da fração mineral dos RCC como fonte de agregados para produção de novos concretos. Porém, devido à presença de argamassa antiga aderida sobre a superfície do agregado original, o Agregado Reciclado de Concreto (ARC) possui características que influenciam negativamente nas propriedades dos novos concretos produzidos com este. Com isto, surge a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que busquem meios de modificar o ARC reduzindo o efeito deste nas propriedades dos concretos, como esta, que tem como objetivo avaliar como diferentes métodos de tratamentos dos agregados reciclados de concreto (ARC) influenciam nas propriedades do concreto. Foram produzidos seis traços de concreto: dois traços de referência, um sem ARC e um com ARC; três traços contendo ARC utilizando o método de mistura em dois estágios (MMDE) associado com cimento Portland (CP), metacaulim (MK) e nanosílica (NS); e um traço contendo ARC submetido a carbonatação acelerada. A porcentagem de ARC utilizada foi de 20% de substituição em relação ao volume de agregado graúdo convencional. Foram avaliados nos traços a massa específica no estado fresco, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão e por capilaridade, migração de cloretos no estado não estacionário e frente de carbonatação. Os resultados obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas e durabilidade para o traço contendo ARC não tratado e ARC tratado com CP foram semelhantes ao traço referência, sem ARC. Os traços contendo MK e MK mais NS obtiveram uma melhora significativa em relação aos traços referência para todos os ensaios, com exceção do ensaio de carbonatação acelerada. O traço com ARC carbonatado apresentou melhora significativa na resistência à compressão, no módulo de elasticidade, na absorção por imersão e na resistência a migração de cloretos. Os resultados evidenciam que ocorrem mudanças positivas nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos com ARC que foram submetidos ao MMDE contendo CP, MK e NS, além do traço contendo ARC carbonatado,

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto. Durabilidade. Metacaulim. Nanosílica.

ABSTRACT**TREATMENT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE FOR PRODUCTION OF CONCRETE WITH STRUCTURAL FUNCTION****Author: Érica Silva da Nóbrega****Advisor: Valdirene Maria Silva Capuzzo****Postgraduate Program in Structures and Civil Construction of Universidade de Brasília
Brasilia, June of 2022**

As a result of the growth of the construction sector, there was an increase in the exploitation of raw materials, leading to a large generation of construction and demolition waste (CDW) that need an alternative destination other than disposal. This highlights the idea of reusing the mineral fraction of the CDW as a source of aggregates for the production of new concrete. However, due to the presence of old mortar adhered on the surface of the original aggregate, the Recycled Concrete Aggregate (RCA) has characteristics that affects negatively the properties of the new concretes produced with it. As a result, it emerges the need of new researches that seeks ways to modify the RCA reducing its effects on the properties of concrete. This research aims to evaluate how different methods of treatment of recycled concrete aggregates (RCA) influence the properties of concrete. Six concrete mixes were produced: two reference mixes, one without RCA and one with RCA; three traces containing RCA using the two-stage mixing approach (TSMA) associated with Portland cement (PC), metakaolin (MK) and nanosilica (NS); and a trace containing carbonated RCA. The percentage of replacement of RCA used was 20% of the volume of ordinary coarse aggregate. The density of the fresh concrete, compressive strength, elastic modulus, water absorption by immersion and water absorption by capillarity, chloride migration and carbonation front were evaluated in the concretes. The results obtained in the mechanical properties and durability tests for the mix containing untreated RCA and RCA treated with PC were similar to the reference mix, without RCA. The traces containing MK and MK plus NS obtained a significant improvement compared to the reference concrete for all tests, excepted for the carbonation test. The mix containing carbonated RCA showed significant improvement in compressive strength, elastic modulus, water absorption by immersion and chloride migration resistance. The results shows positive changes in the mechanical and durability properties of concretes containing RCA that were subjected to TSMA containing PC, MK and NS, and for the mix containing carbonated RCA, showing the feasibility of using RCA to manufacture structural concrete.

Key-words: Recycled concrete aggregate. Durability. Metakaolin. Nanosilica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos:.....	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	23
2.2	AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO	24
2.2.1	Normatização do uso de agregados reciclados no mundo.....	24
2.2.2	Características dos ARC e dos concretos com ARC	27
2.2.3	Zona de Transição Interfacial	29
2.3	TRATAMENTOS EM AGREGADOS RECICLADOS	32
2.3.1	Tratamentos por remoção de argamassa aderida.....	33
2.3.2	Tratamentos por modificação superficial da argamassa aderida.....	34
3	METODOLOGIA.....	46
3.1	MATERIAIS.....	49
3.1.1	Cimento Portland.....	49
3.1.2	Materiais cimentícios suplementares.....	51
3.1.3	Agregado miúdo natural	54
3.1.4	Agregado graúdo britado	55
3.1.5	Agregado reciclado de resíduo de concreto.....	56
3.1.6	Água de amassamento	58

3.1.7	Aditivo superplastificante.....	58
3.2	DOSAGEM DOS CONCRETOS	58
3.2.1	Determinação curva de absorção de água dos ARC.....	60
3.2.2	Tratamentos e produção dos traços	61
3.3	ENSAIO NO ESTADO FRESCO	67
3.3.1	Massa específica	67
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	67
3.4.1	Resistencia à compressão simples	68
3.4.2	Módulo estático de elasticidade à compressão	68
3.5	ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES DE DURABILIDADE.....	68
3.5.1	Absorção de água por imersão e índice de vazios	68
3.5.2	Absorção de água por capilaridade.....	69
3.5.3	Migração de cloretos no estado não estacionário	71
3.5.4	Carbonatação acelerada	77
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	79
4	RESULTADOS.....	81
4.1	ENSAIO NO ESTADO FRESCO	81
4.1.1	Massa específica no estado fresco	81
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	81
4.2.1	Resistência à compressão simples	81
4.2.2	Módulo estático de elasticidade à compressão	85
4.3	ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES DE DURABILIDADE.....	86
4.3.1	Absorção por imersão e índice de vazios	87
4.3.2	Absorção por capilaridade	88
4.3.3	Migração de cloretos no estado não-estacionário.....	91

4.3.4	Carbonatação acelerada	93
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5	CONCLUSÃO.....	97
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICES	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquematização da formação da dupla ZTI.....	31
Figura 2.2 - Formação da dupla zona de transição interfacial (a) fotografia; (b) MEV.....	31
Figura 2.3 - (a) Nova ZTI submetida ao tratamento por MMDE; (b) Nova ZTI produzida através do método de mistura convencional.	35
Figura 3.1 - Organograma do programa experimental.	47
Figura 3.2 - Difratoograma de raios-x do aglomerante.	51
Figura 3.3 - Difratoograma de raios-x do metacaulim.	53
Figura 3.4 - Difratoograma de raios-x da nanosílica.	53
Figura 3.5 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	55
Figura 3.6 - Curva granulométrica do agregado graúdo britado.	56
Figura 3.7 - Agregado reciclado de concreto utilizado na pesquisa.	57
Figura 3.8 - Curva de absorção de água dos ARC	60
Figura 3.9 – Processo de mistura utilizando o MMDE deste estudo.....	62
Figura 3.10 – Procedimentos de mistura para cada traço	63
Figura 3.11 - Teste de carbonatação do ARC com solução de fenolftaleína.....	65
Figura 3.12 - Pré- molhagem dos ARC dos traços (a) CARC, (b) CARC-CP, (c) CARC-CPMK, e (d) CARC-CPMKNS.	66
Figura 3.13 - (a) Corpos de prova imersos em água; (b) Corpos de prova em fervura.	69
Figura 3.14 - (a) corpos de prova em lâmina d'água; (b) verificação da distribuição de água na amostra rompida.	70
Figura 3.15 - Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial.	71

Figura 3.16 - Processo de pré-condicionamento das amostras.....	72
Figura 3.17 - Amostras posicionadas em luvas de PVC com laterais vedadas.	73
Figura 3.18 - (a) aparato de ensaio montado sobre a base de 30°; (b) visão interna do aparato.	73
Figura 3.19 - Ensaio de migração de cloretos em andamento.	75
Figura 3.20 - (a) amostras partidas com solução de nitrato de prata; (b) medição da frente de penetração de cloretos.	75
Figura 3.21 - Procedimento de medição da frente de penetração de cloretos.	76
Figura 3.22 - (a) câmara de carbonatação; (b) disposição dos prismas no interior da câmara.	78
Figura 3.23 - (a) Prismas rompidos para medição da frente de carbonatação; (b) Medição da frente de carbonatação.	79
Figura 4.1 - Resistência à compressão dos concretos com 1, 3, 7, 28 e 253 dias de idade.	82
Figura 4.2 - Módulo estático de elasticidade à compressão dos concretos produzidos.....	85
Figura 4.3 - Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos aos 253 dias.....	87
Figura 4.4 - Absorção de água por capilaridade e ascensão capilar dos concretos produzidos aos 253 dias.....	89
Figura 4.5 - Sorvidade dos traços.	90
Figura 4.6 - Coeficiente de migração de cloretos dos traços aos 253 dias de idade.....	91
Figura 4.7 - Frente de carbonatação dos concretos.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Panorama geral das especificações internacionais para uso de agregados reciclados em concreto.....	26
Tabela 2.3 – Principais referências consultadas.	44
Tabela 3.1 - Variáveis dependentes e independentes	48
Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova produzidos.	49
Tabela 3.3 - Ensaios de caracterização do cimento Portland.	50
Tabela 3.4 - Caracterização física do aglomerante.....	50
Tabela 3.5 - Ensaios de caracterização dos materiais cimentícios suplementares.	51
Tabela 3.6 - Caracterização química do MK e da NS por FRX.	52
Tabela 3.7 - Propriedades da nanosfílica.	52
Tabela 3.8 - Ensaios de caracterização do agregado miúdo natural.	54
Tabela 3.9 - Caracterização do agregado miúdo.	54
Tabela 3.10 - Ensaios de caracterização do agregado graúdo britado.	55
Tabela 3.11 - Caracterização do agregado graúdo.	56
Tabela 3.12 - Ensaios de caracterização do agregado de resíduo de concreto.	57
Tabela 3.13 - Caracterização física do agregado reciclado de concreto.....	57
Tabela 3.14 - Propriedades Master Glenium® 51.	58
Tabela 3.15 - Nomenclatura e características dos traços.	59
Tabela 3.16 - Quantitativo de material de cada traço em kg/m ³	67
Tabela 3.17 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos.	74
Tabela 4.1 - Massa específica dos concretos produzidos no estado fresco.	81

Tabela A.1 - Valores individuais de resistência à compressão simples (MPa).....	112
Tabela A.2 - Valores individuais módulo estático de elasticidade à compressão (GPa).....	113
Tabela A.3 - Valores individuais de absorção de água por imersão (%) e índice de vazios (%).	113
Tabela A.4 - Valores individuais de absorção de água por capilaridade (g/cm ²) e ascensão capilar (mm).	114
Tabela A.5 - Valores individuais da frente de carbonatação dos concretos (mm) aos 253 dias de idade e 211 dias de carbonatação.	115
Tabela A.6 - Parâmetros de ensaio e resultados individuais de migração de cloretos aos 253 dias.....	116

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARC – Agregado de Resíduo de Concreto

RCC – Resíduos da Construção Civil

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Água/cimento

a/agl – Água/aglomerante

CP – Cimento Portland

MK – Metacaulim

NS - Nanosílica

FRX – Fluorescência de raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MMDE – Método de Mistura em Dois estágios

CO₂ - Dióxido de carbono

CH - Hidróxido de cálcio

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

SiO - Óxido de silício

SiO₂ - Dióxido de silício

MPa - Megapascal

pH - Potencial Hidrogeniônico

ZTI – Zona de Transição Interfacial

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem grande importância na economia de diversos países, inclusive no Brasil. Com o desenvolvimento deste setor ocorre um aumento da extração de matéria prima para fabricação de materiais básicos, como aglomerantes, agregados e blocos cerâmicos, de materiais de acabamento, como placas cerâmicas e tintas, e também de ferramentas para execução dos serviços. Ainda em consequência do desenvolvimento do setor construtivo, há uma crescente geração de resíduos da construção civil (RCC) advindos da cadeia construtiva, desde a extração das matérias primas até as fases de construção, reparos, reformas e demolições.

A organização atual das cidades e a crescente preocupação ambiental faz com que surja a necessidade de se dar um destino alternativo aos RCC além do seu descarte mais comum feito em aterros. Em resposta a essa necessidade, o reaproveitamento da fração mineral dos resíduos de construção se tornou uma opção viável para a produção de novos concretos.

A reciclagem do RCC gera a produção de agregados, podendo ser classificados segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021) em: ARM, agregado reciclado constituído por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos; ARCI, agregado reciclado constituído majoritariamente por materiais cimentícios diversos; ARC, agregado reciclado constituído majoritariamente por resíduos de concreto.

Os resíduos oriundos da construção civil, quando comparados aos resíduos de outras indústrias, trazem consigo vantagens relacionadas as suas características de resistência e por possuírem baixas quantidades de outros materiais que podem ser considerados contaminantes. Os ARC possuem certa quantidade de argamassa do concreto original aderida em sua superfície, origem de características como baixo valor de massa específica, alta porosidade e presença de microfissuras, além do alto valor de absorção de água e teor de sulfato, fatores que modificam as propriedades do concreto produzido com o ARC em relação ao concreto produzido com agregado natural, afetando sua elasticidade, retração, fluência, durabilidade e propriedade mecânica (DE JUAN e GUTIÉRREZ, 2009; TAM *et al.*, 2021).

Em alguns países, principalmente na Europa e na Ásia, os ARC são utilizados para a produção de concreto estrutural. No Brasil, a NBR 15116 (ABNT, 2021) especifica a utilização do ARC para a produção de concretos estruturais e não estruturais.

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Manter a cadeia produtiva da construção civil a base de matéria prima extraída de recursos naturais coloca o meio ambiente em grande risco. Com o aumento da produção de novas construções de tecnologia avançada e demolição de construções antigas, se tem a geração de um grande volume de resíduos de construção que precisa de uma destinação além do descarte.

Com esse propósito, pesquisadores passaram a investir em pesquisas visando substituir o agregado natural do concreto por agregados reciclados. No entanto, em virtude de suas características negativas, surge a necessidade de desenvolver métodos que torne viável a utilização dos ARC em diferentes produtos da cadeia produtiva da construção civil sem afetar o desempenho dos mesmos quando comparados à produtos feitos com agregados naturais, tais como concretos estruturais.

Devido à alta porosidade da argamassa aderida aos ARC, os tratamentos são realizados com o intuito de reverter as consequências dessa alta porosidade e da formação da dupla zona de transição durante a fabricação de um novo concreto. Tais tratamentos buscam melhorar a formação da nova zona de transição interfacial, além de reduzir nos ARC a porosidade e a absorção de água.

Vários estudos foram desenvolvidos com o ARC, dentre estes alguns focaram em como melhorar as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado, seja pela remoção da argamassa antiga aderida (PURUSHOTHAMAN *et al.*, 2015; DIMITRIOU *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2019), modificação do método de mistura (TAM *et al.*, 2005; TAM e TAM, 2008; SILVA e CAPUZZO, 2020; CHAND *et al.*, 2022), pela utilização de materiais cimentícios suplementares (KOU *et al.*, 2011; KOU e POON, 2012; KOU e POON, 2013; RADONJANIN *et al.*, 2013; KAPOOR *et al.*, 2016; MUDULI e MUKHARJEE, 2019; MUDULI e MUKHARJEE, 2020; MUKHARJEE *et al.*, 2015; SHAIKH *et al.*, 2018; ZENG *et al.*, 2020; ALQARNI *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2022; ZHU *et al.*, 2022; CHEN e JIAO, 2022), ou pela carbonatação acelerada (ZHANG *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2015b; TAM *et al.*, 2016; XUAN *et al.*, 2016; LIANG *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2022).

Existe a possibilidade de produzir concretos com utilização de ARC em substituição ao agregado convencional, tratando superficialmente estes ARC pela combinação do MMDE com a utilização de aglomerante e MCS e com carbonatação acelerada. Através deste estudo

procurou-se colaborar e incentivar com a pesquisa sobre a utilização de materiais reciclados, além de corroborar em viabilizar o desenvolvimento sustentável na construção civil.

Este trabalho foi produzido no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB). Esta dissertação se enquadra na área de Sistemas Construtivos e Materiais, dentro da linha de pesquisa de ‘Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção’. No PECC, de 2001 a 2021, algumas pesquisas foram desenvolvidas por outros pesquisadores abordando estudos envolvendo aspectos de durabilidade do concreto (POZZAN, 2001; PESSÔA, 2002; LARA, 2003; MAIA, 2003; FIGUEIREDO, 2004; NEVES, 2005; FILHO, 2005; SILVA, 2005; SANTOS, 2006; COSTA, 2012; ORDÓÑEZ, 2013; MENDES, 2016; MIRANDA, 2018; CÂMARA, 2020; PEREIRA, 2021; SOUZA 2021). Outros pesquisadores trabalharam com materiais reciclados fora do âmbito de produção de concreto (SOUSA, 2001; SANTANA, 2018). Além de um trabalho envolvendo especificamente a produção de concreto com agregados reciclados de concreto (SILVA, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa consiste em estudar o comportamento de novos concretos produzidos com Agregado Reciclado de Concreto (ARC) tratados com diferentes sistemas de tratamento superficial.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Verificar a influência do método de mistura em dois estágios (MMDE) utilizando cimento Portland, metacaulim e nanosílica, e da carbonatação acelerada, como tratamento superficial do ARC na produção de novos concretos;
- Estudar a influência da substituição de 20% do agregado graúdo convencional por agregado reciclado de concreto tratado superficialmente sobre a massa específica do concreto no estado fresco e sobre a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto no estado endurecido;
- Avaliar os índices físicos e as propriedades de durabilidade dos concretos produzidos com os agregados reciclados de concreto tratados superficialmente.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução e contextualiza o tema, mostrando sua relevância, além de dispor os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

O segundo capítulo contém a fundamentação teórica necessária para entendimento e produção da pesquisa. São tratados os temas de resíduos da construção civil, agregados reciclados de concretos e suas características, concretos produzidos com ARC, tratamentos realizados nos ARC e parâmetros de durabilidade avaliados nos concretos produzidos com ARC.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia da pesquisa, contendo os materiais utilizados e os métodos de caracterização destes, o método de dosagem escolhido para produção dos concretos, os ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido, incluindo as propriedades mecânicas e de durabilidade, além de detalhar a análise estatística escolhida para análise dos dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa, com suas respectivas análises e comparações com trabalhos realizados previamente.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica com os conceitos necessários para contextualização e entendimento dessa dissertação, incluindo resíduos de construção civil, agregados de resíduo de concreto, tratamentos realizados em agregados reciclados e durabilidade do concreto.

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Com o crescimento do setor da construção civil, cresceram as obras de construção, reforma e demolição, gerando uma grande quantidade de resíduos. Para minimizar as consequências do grande volume de resíduos gerados, debates e pesquisas surgem com o intuito de conscientizar a sociedade sobre a importância de dar uma destinação alternativa ao resíduo que previamente seria descartado, priorizando a preservação ambiental.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução nº307 de 2002 define como resíduos da construção civil todos os resíduos oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Essa resolução divide os resíduos em quatro classes distintas:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como materiais a base de cimento (concreto, argamassa, blocos), materiais cerâmicos (blocos, tijolos, placas, telhas) e solos e rochas provenientes de terraplanagem;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, como plásticos, metais, vidros, madeiras, papel e papelão;
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, que possam ser nocivos à saúde, como tintas, solventes, óleos, telhas de amianto, resíduos de clínicas radiológicas ou instalações industriais.

2.2 AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO

O concreto constitui-se de agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e água, basicamente, sendo que a porcentagem de agregado que constitui o concreto gira em torno de 60 a 80% de sua composição. A questão que envolve a utilização de agregados naturais, é que estes têm fonte finita, porém são preferidos por conta da facilidade de se encontrar o material à venda e pelo baixo valor de mercado, além de proporcionar um produto final de boa qualidade nos concretos produzidos.

Unindo os fatores de que a reserva natural de fontes de agregados é finita, e que a cada dia que passa a quantidade de resíduos da construção disposta no planeta aumenta, reciclar os resíduos de construção civil de Classe A (CONAMA, 2002), transformando-os em agregados, se tornou uma alternativa para minimizar o impacto ambiental causado pelas ações humanas na extração de matéria-prima e pela geração de resíduos. A reciclagem tem se tornado cada vez mais visível, por necessidade de preservação ambiental, e também por motivações políticas.

Os resíduos da construção civil são extremamente heterogêneos, o que dificulta seu processo de reciclagem e reutilização na construção civil, principalmente quanto à sua utilização na produção de concretos. Dependendo da amostra de material, sua composição pode sofrer grande variabilidade em função da fonte de origem ou do tipo de construção, prejudicando seu aproveitamento pelas indústrias (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004).

2.2.1 Normatização do uso de agregados reciclados no mundo

A aplicação dos agregados reciclados na construção civil tem sido estudada em diversos países. A partir das pesquisas realizadas na área, cada país começou a estabelecer a normatização técnica, permitindo a utilização segura dos agregados reciclados na construção civil. Até onde se sabe, a primeira normatização internacional veio através da *International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures (RILEM)*, em 1994, nomeada de “*Specifications for Concrete with Recycled Aggregates*”.

No Brasil, até recentemente a norma vigente para utilização de resíduos de construção na construção civil era a NBR 15116 (ABNT, 2004). Esta norma dividia os resíduos sólidos de construção civil, classe A, em Agregado Reciclado de Concreto (ARC) e Agregado de Resíduo Misto (ARM). O ARC devendo ser composto em sua fração graúda de no mínimo 90% em

massa de fragmentos de materiais à base de cimento Portland e rochas, enquanto o ARM sendo composto por menos de 90% em massa de fragmentos de materiais à base de cimento Portland e rochas. A NBR 15116 (2004) permitia a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos somente em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Em 2021 a NBR 15116 foi atualizada, assim como algumas de suas definições. O agregado reciclado, proveniente dos resíduos de construção classe A passa a ser dividido em 3 categorias:

- ARCI: agregado reciclado constituído majoritariamente por materiais cimentícios diversos, como concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto e até mesmo resíduo de cerâmica vermelha.
- ARCO: agregado reciclado constituído majoritariamente por resíduos de concreto.
- ARM: agregado reciclado constituído por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

Com a atualização desta norma em 2021, alguns tipos de agregados reciclados passaram a ser admitidos em concretos estruturais. Para a utilização em concreto estrutural passou a ser admitido o agregado reciclado do tipo ARCO em substituição ao agregado convencional no teor de, no máximo 20%, contanto que os concretos produzidos sejam especificados para as classes de agressividade ambiental I ou II, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quanto a produção de concretos de função não estrutural, a NBR 15116 de 2021 permite que sejam utilizadas as classes ARCO, ARCI e ARM, para o teor de até 100 % de substituição da massa dos agregados convencionais. Ressalta-se que podem ser produzidos também artefatos pré-fabricados sem função estrutural, argamassas de assentamento, revestimentos e contrapisos com esses materiais.

Devido a nomenclatura utilizada internacionalmente, *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), neste trabalho o ARCO será chamado de ARC.

Além do Brasil, que após a atualização da normatização passou a permitir a utilização dos ARC em concretos estruturais, alguns outros países já permitem a utilização dos agregados reciclados com função estrutural. Na

Tabela 2.1 está um breve resumo nas normatizações em diferentes países e das especificações de cada uma para a utilização dos ARC, principalmente para produção de novos concretos.

Tabela 2.1- Panorama geral das especificações internacionais para uso de agregados reciclados em concreto

País	Classe	Densidade mínima (kg/m ³)	Máx. absor. água (%)	Máx. teor cloretos (%)	Máx. teor sulfatos (%)	Subst. Máx. (%)		Uso	Grupo de resistência
						Graúdo	Miúdo		
Brasil	ARCO	s.e.	7	0,1	0,1	20%	20%	Concreto estrutural	C20/25
	ARCI	s.e.	12	0,2	0,1	100%	100%	Concreto não estrutural	-
	ARM	s.e.	12	0,2	0,1	100%	100%		
Alemanha	ARC - I	2000	10	0,04	0,8	20-35	0	Concreto estrutural	C30/37 (20% de subst.)
	ARC - II	2000	15	0,04	0,8	20-35	0		C25/30 (35% de subst.)
	Ag. Rec. alvenaria III	1800	20	0,04	0,8	s.e.		Concreto não estrutural	s.e.
	ARM	1500	s.e.	0,15	s.e.	s.e.			
Honk Kong	ARC	2000	10	0,05	1	20 ou 100	0	Concreto estrutural	C20 (100% de subst.); C35 (20% de subst.)
Japão	ARM	2200	7	s.e.	s.e.	100	100	Concreto não estrutural	18
Japão	ARM	2500 (graúdo e miúdo)	3 graúdo/3,5 miúdo	0,04	s.e.	s.e.		sem limitação	48
Japão	ARM	2300 (graúdo); 2200 (miúdo)	5 graúdo/7 miúdo	s.e.	s.e.	s.e.	s.e.	(e)	s.e.
Japão	ARM	s.e.	7 graúdo/13 miúdo	s.e.	s.e.	s.e.	s.e.	Reaterros, nivelamentos	s.e.
RILEM	ARC+AP	2400	3	(c)	1(a)			Ambientes secos e molhados - não agressivos	Sem limitação
	ARC	2000	10	(c)	1(a)	100	(d)		C50/60
	Ag. Rec. Alvenaria	1500	20	(c)	1(a)				C16/20
Reino unido	ARC	s.e.	s.e.	s.e.	1	20	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARM	s.e.	s.e.	s.e.	s.e.	s.e.	0	Concreto não estrutural	s.e.

Holanda	ARC	2000	s.e.	0,05 (b)	1	100	(d)	Ambientes não agressivos	C40/50
	ARM	2000	s.e.	0,05 (b)	1				C20/25
Portugal	ARC I	2200	7	(c)	0,8	25	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARC II	2200	7	(c)	0,8	20	0		C35/45
	ARM	2000	7	(c)	0,8	s.e.	0	Concreto não estrutural	s.e.
Noruega	ARC	2000	10	s.e.	s.e.				
	ARM	1500	20	s.e.	s.e.				
Suíça	ARC	s.e.	s.e.	0,03	1			Concreto reforçado	C30/37
	ARM	s.e.	s.e.	s.e.	1	100	100	Concreto não estrutural	s.e.
Dinamarca	ARC	2200	s.e.	s.e.	s.e.				
	ARC	2200	s.e.	s.e.	s.e.	100	20	Ambientes não agressivos	C40
	ARM	1800	s.e.	s.e.	s.e.				C20

Notas:

s.e – Sem especificação;

(a) Solúvel em água;

(b) Para concreto reforçado;

(c) Informações adicionais em normas específicas;

(d) Somente se misturados com agregado graúdo natural.

Fonte: Adaptado de Kiouranis *et al.* (2016).

2.2.2 Características dos ARC e dos concretos com ARC

Algumas características dos agregados vão influenciar diretamente as propriedades do concreto produzido como a composição granulométrica, a massa específica, a porosidade, a absorção de água, o formato e textura das partículas, o módulo de elasticidade e o teor de impurezas presentes (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os ARC geralmente são oriundos de concretos antigos ou que apresentaram algum problema durante a execução, fatores que os fizeram ser descartados como resíduos. Estes materiais apresentam em sua composição duas fases distintas, o agregado natural e a argamassa aderida na superfície do agregado natural. A argamassa, em relação ao agregado natural, é um produto mais poroso e suas propriedades são dependentes dos materiais componentes e de seu processo

de fabricação. Portanto, a composição e o processo de cura do concreto que originou o ARC vão afetar algumas propriedades do mesmo (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; FONSECA *et al.*, 2011).

A massa específica ou densidade de um material é a razão da sua massa pelo seu volume, desconsiderando os poros permeáveis das partículas e os espaços vazios entre as partículas. Na massa unitária, por sua vez, considera-se a razão entre a massa e o volume total considerando todos os espaços vazios, os vazios do agregado e os vazios entre as partículas dos agregados. A combinação das fases agregado natural mais argamassa aderida faz com que a massa específica e a massa unitária do ARC sejam menores em comparação aos agregados naturais (LOVATO, 2007).

De maneira geral, os materiais utilizados na construção civil são materiais porosos. A estrutura porosa depende da formação e composição do material, como, por exemplo, os agregados originários de rochas, dependentes da formação geológica, e os materiais a base de cimento Portland, dependentes do traço, da quantidade de água e do processo de cura. Portanto, um material poroso vai conter uma matriz sólida que possui espaços intersticiais não preenchidos por sólidos, mas ocupados por fluidos como ar, água e vapor de água (RATO, 2006).

Devido à presença de argamassa residual aderida aos agregados naturais, discute-se sobre as vantagens e desvantagens da produção de novos concretos contendo ARC. Essa argamassa antiga aderida sobre o agregado original, possui superfície rugosa, além de ser muito porosa e ter microfissuras (TAM *et al.*, 2005; KOU e POON, 2010). Essas características impactam diretamente no desempenho físico e mecânico dos ARC quando comparados aos agregados convencionais, por gerar valores inferiores de resistência mecânica e de massa específica, e gerando valores superiores de absorção de água (GUEDES *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2014b; PEDRO *et al.*, 2017). Portanto, a presença da argamassa aderida ao ARC vai influenciar negativamente em diversos parâmetros e na performance do ARC quando comparado ao agregado convencional (BAI *et al.*, 2020). Reduzir a absorção de água e a porosidade efetivamente de maneira a melhorar a performance do concreto produzido com o ARC se torna um desafio (SHI *et al.*, 2016).

A capacidade do ARC de absorver água afeta diretamente o concreto no estado fresco, principalmente em relação a trabalhabilidade do concreto, pois o agregado absorverá parte da água de amassamento. Alguns autores recomendam que seja feita a pré-molhagem dos

agregados reciclados para reduzir a absorção de água da pasta, de forma que a umidade atinja 80% da absorvidade total do ARC (POON *et al.*, 2004; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; LIANG *et al.*, 2019). Ressalta-se que a NBR 15116 (ABNT, 2021) recomenda para a produção de concretos e argamassas com agregados reciclados seja feita a pré-molhagem dos agregados para ajuste das propriedades reológicas, como trabalhabilidade, consistência e perda de abatimento. Caso não seja realizado o processo de pré-saturação, deve-se compensar a água absorvida pelos agregados reciclados, não a incluindo no cálculo da relação água/cimento.

O formato e a rugosidade das partículas de ARC afetam o concreto no estado fresco quanto a sua trabalhabilidade, compacidade e ângulo de atrito interno. As partículas de ARC possuem forma mais irregular, além de serem mais ásperas, fatores que derivam do processo de britagem e moagem, e de sua composição (LEITE, 2001).

No que tange às propriedades mecânicas do concreto produzido com agregados reciclados, estas vão depender de vários fatores, desde as propriedades dos agregados utilizados e da quantidade de substituição feita em relação ao agregado natural, quanto da relação água cimento utilizada (RAHAL, 2007). Quanto maior a incorporação de agregado reciclado na dosagem, maior vai ser a perda das propriedades mecânicas do concreto para todas as idades (GOMES e BRITO, 2009; CEIA *et al.*, 2016; SILVA e CAPUZZO, 2020).

Dentre os parâmetros de durabilidade, observa-se que em diversos estudos ocorrem mudanças negativas nos concretos produzidos em função do aumento do teor de substituição de agregado natural por ARC (EVANGELISTA e DE BRITO, 2010.; DIMITRIOU *et al.*, 2018; KOU e POON, 2012; 2013; BAO *et al.*, 2020). Essa piora ocorre devido as diversas características negativas que o ARC possui e acaba influenciando o produto obtido com esse material. Em contrapartida, diversos autores propuseram métodos para produzir novos concretos contendo ARC de forma a minimizar o efeito negativo do ARC no produto final. Dentre as características que influenciam fortemente no concreto produzido com o ARC, dá-se destaque a dupla zona de transição interfacial deste.

2.2.3 Zona de Transição Interfacial

O concreto possui três fases distintas, os agregados graúdos, a argamassa contendo o agregado miúdo, e a Zona de Transição Interfacial (ZTI), que ocorre como o nome diz na interface de transição da argamassa para o agregado. A ZTI tem um papel determinante na ligação entre a

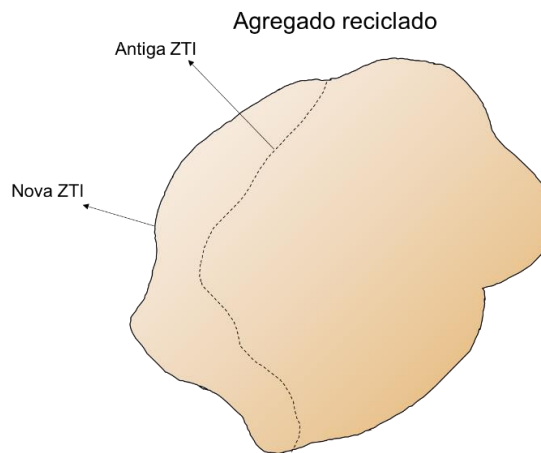
argamassa com o agregado graúdo, sendo uma grande responsável pelo desempenho do concreto.

Apesar da ZTI ser delgada, ela ocupa uma área relativamente grande dentro da matriz de concreto. Assumindo uma espessura de 20 a 50 μm para a ZTI, estima-se que esta pode ocupar de 20 a 40% do volume total da matriz (MEHTA e AITCIN, 1990; TAM *et al.*, 2021b). A ZTI afeta o desempenho do concreto convencional, sendo considerada o ponto mais fraco do conjunto e um limitante da resistência do concreto.

Mehta e Monteiro (2014) descrevem que na moldagem do concreto forma-se um filme de água em torno das partículas de agregado graúdo, gerando uma maior relação água/cimento (*a/c*) no local. Ao acontecer a hidratação do cimento nas proximidades do agregado graúdo, os produtos de hidratação formam cristais maiores devido é alta relação *a/c*, formando uma estrutura mais porosa que na matriz de argamassa. Os cristais de hidróxido de cálcio tendem a assumir a estrutura de placas orientadas, facilitando o escorregamento entre elas ao aplicar uma tensão.

No caso do concreto produzido com ARC, existe um fator preocupante e limitante quanto a sua utilização, a formação da dupla zona de transição interfacial. O ARC possui argamassa antiga aderida ao agregado original, formando uma zona de transição antiga, e com a produção do novo concreto, forma-se uma nova zona de transição sobre a argamassa aderida (POON *et al.*, 2004; KONG *et al.* 2010; SHI *et al.*, 2016; SILVA, 2019; LIANG *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019). A formação da dupla ZTI no concreto contendo ARC está esquematizada na Figura 2.1.

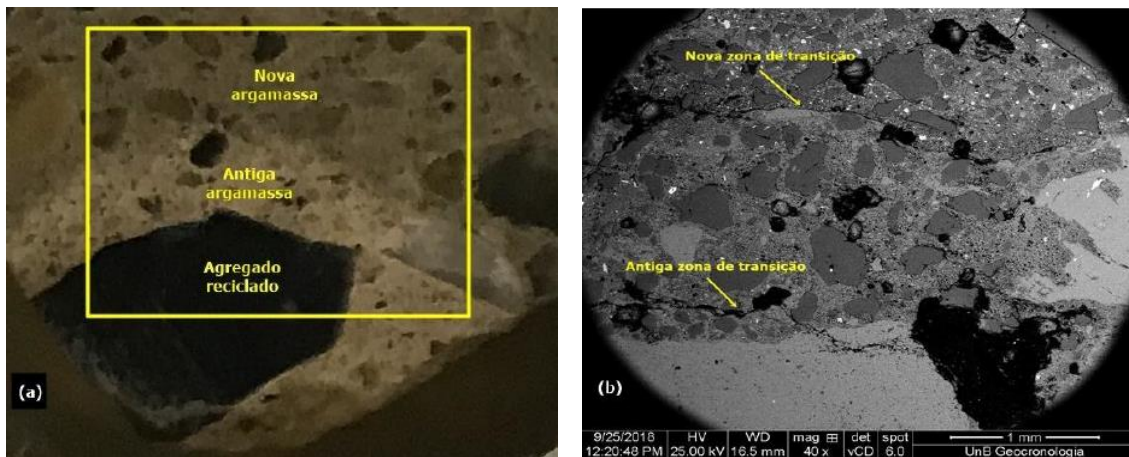
Figura 2.1 - Esquemática da formação da dupla ZTI.



Fonte: Elaboração própria.

Através da microscopia eletrônica de varredura, Silva (2019) conseguiu visualizar e capturar imagens nos concretos avaliados nas quais é possível visualizar a formação da dupla zona de transição, diferenciando a agregado antigo com a argamassa antiga, e a nova argamassa, Figura 2.2.

Figura 2.2 - Formação da dupla zona de transição interfacial (a) fotografia; (b) MEV.



Fonte: SILVA (2019).

A antiga ZTI do ARC se encontra na divisão entre o agregado gráudo original e a argamassa antiga aderida sobre este. A questão que envolve a ZTI antiga é que esta é o elo frágil do novo concreto produzido (ETXEBERRIA *et al.*, 2006). A antiga ZTI tem como característica possuir muitos poros e fissuras que retêm parte da água que seria destinada à hidratação da nova pasta de cimento e da nova ZTI do concreto. Em relação a antiga ZTI, ainda se deve levar em consideração que os concretos utilizados para produção de ARC geralmente são concretos

antigos, de baixa resistência ou que apresentaram algum problema durante sua vida útil. Portanto, como a ZTI é o elo fraco na junção do agregado com a pasta, melhorar as propriedades da ZTI acaba por melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (TAM *et al.*, 2021b).

Dentre os pesquisadores que buscaram trabalhar melhorando as ZTI, Tam *et al.* (2005) observaram que ao utilizar o método de mistura em dois estágios (MMDE), as ZTI foram preenchidas em relação aos concretos produzidos pelo método de mistura normal. Tam *et al.* (2008) constataram que ao utilizar o MMDE aprimorado com o uso de sílica ativa, e sílica ativa com cimento, ocorreu o preenchimento dos poros e fissuras do ARC, principalmente em ambas ZTI, proporcionando maior resistência mecânica ao concreto. Silva (2019) verificou com o ensaio de microscopia eletrônica de varredura que ao utilizar 25% do cimento total na primeira etapa da mistura pelo MMDE, as novas ZTI formadas ficaram mais homogêneas quando comparadas as ZTI dos concretos que não receberam tratamento.

Utilizando métodos de tratamento diferentes do MMDE, WANG *et al.* (2020) verificaram que pelo tratamento do ARC por biodeposição com bactérias houve uma redução da absorção de água pela melhora das características da superfície dos agregados, melhorando a resistência a fragmentação destes. Sasanipour *et al.* (2021) trabalharam com o pré-tratamento dos ARC por submersão em pasta de sílica ativa, a qual forneceu uma melhora da ZTI, reduzindo a permeabilidade dos espécimes produzidos e aumentando a resistividade elétrica do concreto.

Usualmente, a investigação da ZTI é feita utilizando as imagens obtidas das amostras pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), mas pode ser complementada por ensaios como o de microsonda eletrônica, micro/nanoidentação e análise termogravimétrica.

2.3 TRATAMENTOS EM AGREGADOS RECICLADOS

Diferentes técnicas de tratamento dos ARC vêm sendo desenvolvidas com o intuito de amenizar o efeito negativo que os agregados reciclados de resíduo de concreto geram no concreto devido à baixa qualidade dos ARC. Estes apresentam alta porosidade e absorção de água, baixo valor de massa específica e a fragilidade das zonas de transição.

Os tratamentos realizados nos ARC podem ser divididos em duas classes principais, uma que remove as camadas de argamassa aderidas aos agregados, e outra que trabalha com métodos

que modificam a parte mais superficial dos agregados reciclados (PURUSHOTHAMAN *et al.*, 2015).

A seguir serão apresentados alguns estudos existentes que trabalharam com esses métodos de tratamento, sendo divididos em tratamentos por remoção de argamassa aderida e tratamentos por modificação superficial.

2.3.1 Tratamentos por remoção de argamassa aderida

Purushothaman *et al.* (2015) em seu estudo fizeram o tratamento dos agregados com soluções acídicas e mecanicamente. O tratamento químico foi realizado com dois solventes ácidos, o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄). O tratamento mecânico foi feito no equipamento de abrasão Los Angeles por 5 minutos, com os ARC em temperatura ambiente e, posteriormente, após o aquecimento dos agregados. Para todos os tratamentos houve aumento na massa específica dos agregados, sinal de que a argamassa aderida em sua superfície foi retirada. Houve também ganho de resistência à compressão dos concretos produzidos com o ARC tratado. Para o tratamento com HCl obteve-se um ganho de 12,43% na resistência, e para o traço tratado com H₂SO₄, houve ganho de 16,47%. Para o tratamento mecânico à temperatura ambiente o ganho na resistência foi de 15,32%, enquanto para o tratamento mecânico à quente o ganho foi de 20,81%.

Dimitriou *et al.* (2018) trabalharam com o ARC tratado mecanicamente, colocando os agregados em um misturador de concreto de eixo inclinado com 10 rpm por 5 horas para que houvesse a retirada da argamassa aderida. Aos 28 dias, para os concretos produzidos com teores de substituição de 50 e 100%, a resistência à compressão teve um aumento de 19,7% e de 32%, respectivamente, em relação ao concreto produzido com o ARC sem tratamento.

Tang *et al.* (2019) aplicaram em seu estudo três formas de tratamento: uma com ácido sulfúrico (SA) para remoção da argamassa aderida, uma com impregnação exclusiva de sílica ativa (SF), e uma com a combinação de tratamento com ácido sulfúrico e sílica ativa (SASF). Apesar de apresentarem melhoras nas propriedades físicas, estatisticamente essas melhoras não foram significativas. O tratamento com ácido sulfúrico desenvolveu uma camada fraca de argamassa aderida ao ARC, reduzindo a resistência mecânica do concreto. Os melhores resultados de ganho de resistência à compressão foram para os resultados obtidos com o tratamento com sílica ativa. Os concretos foram produzidos para teores de 25, 50, 75 e 100% de substituição de

agregado graúdo natural por ARC, apresentando os maiores valores de resistência à compressão para 50% de teor de substituição.

2.3.2 Tratamentos por modificação superficial da argamassa aderida

Tam *et al.* (2021) afirmam que na literatura existem seis métodos principais utilizados para melhorar as propriedades do ARC, sendo estes carbonatação, a auto-regeneração, a colmatação, remoção de argamassa aderida, abordagem de misturas sequenciais e utilização de MCS na produção de novos concretos. Essas seis categorias podem ser divididas em duas grandes categorias principais, ‘melhora por adição’, e ‘melhora por remoção’.

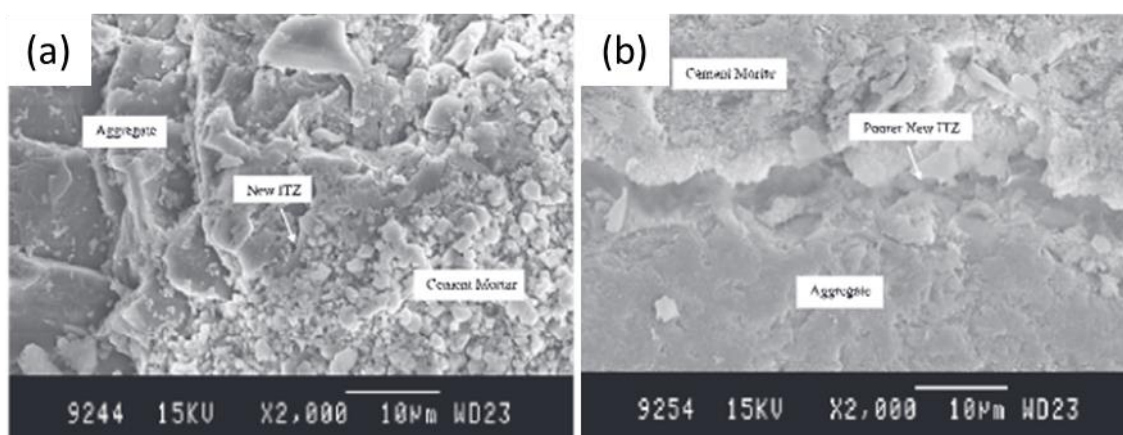
Dentre os tratamentos realizados no primeiro grupo de ‘melhora por adição’, nesta pesquisa será dada maior importância para a modificação da argamassa antiga aderida ao ARC. Destacam-se os tratamentos realizados pela modificação do método de mistura na produção do concreto, que leva a colmatação do mesmo pelo próprio processo de mistura, pode-se citar a colmatação dos agregados por materiais cimentícios suplementares e, por fim, pela carbonatação acelerada dos ARC.

2.3.2.1 Colmatação através da modificação do método de mistura

Tam *et al.* (2005) em busca de melhorar a resistência à compressão do concreto feito com agregado reciclado e diminuir a variabilidade de valores de resistência, propuseram uma nova abordagem para mistura do concreto chamada de método de mistura em dois estágios, do inglês *Two-Stage Mixing Approach* (TSMA). No primeiro estágio da mistura são adicionados os agregados miúdos e graúdos (naturais e reciclados), metade da água de amassamento e a quantidade total de cimento, nessa ordem. No segundo estágio, o restante da água é adicionado, completando a mistura do concreto. Esse método leva à formação de uma fina camada de pasta de cimento na superfície do ARC, que penetra na argamassa antiga aderida ao ARC, preenchendo os poros e pequenas fissuras existentes, aumentando a densidade do concreto, melhorando a zona de transição interfacial, e levando a um concreto com maior resistência à compressão. Em relação ao método de mistura normal, houve um ganho de resistência mecânica aos 28 dias de 21,3% para o teor de substituição de 20% de ARC. Apesar de não focarem em ensaios de durabilidade do concreto em sua pesquisa, os autores deste estudo avaliaram a mudança da ZTI dos concretos produzidos pelo MMDE. Observou-se através das imagens obtidas pela Microscopia Eletrônica de Varredura que a nova ZTI formada teve suas fissuras e

poros preenchidos após a utilização do MMDE. Enquanto isso, o concreto produzido com o método de mistura convencional continuou a apresentar uma ZTI mais porosa e aberta. Na Figura 2.3 (a) é possível observar a nova ZTI submetida ao tratamento com o MMDE, esta se encontra preenchida pelos hidratos da pasta de cimento. Na Figura 2.3 (b) observa-se a nova ZTI do concreto produzido pelo método de mistura convencional, com uma grande quantidade de espaço vazio.

Figura 2.3 - (a) Nova ZTI submetida ao tratamento por MMDE; (b) Nova ZTI produzida através do método de mistura convencional.



Fonte: Tam *et al.* (2005)

Com o desenvolvimento e melhora da nova ZTI pelo MMDE, existe uma grande possibilidade de que alguns parâmetros de durabilidade também possam ter uma evolução em relação aos concretos feitos com o método de mistura convencional.

Tam e Tam (2008) aprimoraram o método TSMA, utilizando nas misturas sílica ativa (TSMAs) e sílica ativa mais cimento (TSMAsc). No primeiro estágio são adicionados o cimento, proporcionalmente à quantidade de ARC, e/ou a sílica ativa, na quantidade de 2% em substituição ao cimento, mais o ARC, mais 50% da água de amassamento. No segundo estágio, são adicionados à mistura os agregados miúdos e grãos naturais, o restante do cimento e os 50% restantes de água. Aos 28 dias, foram obtidos para o teor de 20% de substituição uma melhora na resistência à compressão de 1,97% para o TSMAs, e de 12,87% para o TSMAsc, em relação ao método de mistura normal. A utilização de sílica ativa para colmatação na primeira fase da mistura, proporcionou uma densificação da argamassa antiga do ARC, preenchendo seus poros e microfissuras. Além disso, a utilização de sílica ativa proporcionou uma nova ZTI mais forte, melhorando também as características mecânicas do concreto. Com a

melhora do ARC e da argamassa do concreto, é provável que alguns parâmetros de durabilidade venham a melhorar por consequência.

Em sua pesquisa, Silva e Capuzzo (2020) observaram que a abordagem pelo MMDE com 25% de cimento Portland na primeira fase de mistura proporcionou melhoras na resistência à compressão dos concretos com 91 dias de idade. Quanto aos parâmetros de durabilidade, o traço que utilizou o MMDE com 25% de cimento Portland obteve melhoria em todos os parâmetros analisados, sendo estes: absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica, carbonatação acelerada, migração de cloretos no estado não estacionário, e efeito combinado de carbonatação acelerada e migração de cloretos. Para o traço produzido com 100% de cimento Portland no primeiro estágio de mistura pelo MMDE, observou-se resultados insatisfatórios nos parâmetros tanto mecânicos, quanto de durabilidade do concreto, quando comparados ao método de mistura normal. Silva e Capuzzo justificam que a utilização no primeiro estágio de mistura de 25% de cimento Portland favoreceu a absorção da pasta pelo ARC, levando a uma matriz de concreto mais densa, com melhora na ZTI. Para a utilização de 100% de cimento Portland no primeiro estágio de mistura, a pasta se torna muito densa, dificultando a absorção de água de compensação por parte dos ARC, consequentemente aumentando a relação água/cimento efetiva do concreto.

Chand *et al.* (2022) em seu estudo trataram os ARC inicialmente com uma solução de ácido hidroclorídrico, para depois trata-los superficialmente com metacaulim, pó de pedra-pome e sílica ativa, em conjunto com cimento Portland. Posteriormente utilizaram os ARC tratados na produção de concretos pelo MMDE, com 100% de substituição do agregado graúdo convencional pelo ARC. Em relação ao traço produzido com o ARC não tratado com MCS, obteve-se um aumento de 34,46%, 31,81% e 50,75% na resistência à compressão para os traços produzidos com metacaulim, pó de pedra-pome e sílica ativa, respectivamente. Também foi observado melhora da zona de transição dos traços produzidos com sílica ativa, por intermédio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

2.3.2.2 MCS na produção de concretos com ARC

Kim *et al.* (2005) trabalharam com três tipos de materiais pozzolânicos: silicato de sódio, sílica coloidal e sílica ativa. Os ARC eram mergulhados nas soluções e mantidos no vácuo por 30 minutos, posteriormente sendo secos em forno a 100°C por 24h e resfriados até atingir temperatura ambiente. Houve um aumento da massa específica e redução da absorção de água

e porosidade para os ARC nos três tratamentos. Para os concretos produzidos, após o tratamento dos ARC, a resistência à compressão para os tratamentos com silicato de sódio e sílica ativa foi maior em comparação ao concreto preparado com agregado natural.

Kou *et al.* (2011) produziram concretos contendo cinzas volante (35%), sílica ativa (10%), metacaulim (15%) e escória de alto forno (55%), em conjunto com a utilização de ARC em substituição do agregado natural britado nas porcentagens de 0%, 50% e 100%. Para a resistência à compressão, os traços contendo sílica ativa e metacaulim, com e sem ARC, obtiveram aumento na resistência em relação aos outros traços. Tal efeito é correlacionado tanto ao efeito de fíler, quanto ao efeito pozolânico desses MCS. Quanto aos traços produzidos com cinzas volantes e escória de alto forno, houve um déficit de resistência à compressão nas primeiras idades, o que foi compensado em idades avançadas. O teste de penetração de íons de cloreto mostrou que os concretos contendo ARC apresentarem uma estrutura porosa mais aberta em relação ao concreto de referência contendo somente agregado convencional. Porém, a utilização de MCS levou a uma redução da carga que passou pelos espécimes, mostrando a contribuição positiva da utilização de MCS na produção de concretos contendo ARC, tanto mecanicamente, quanto no quesito durabilidade.

No trabalho de Radonjanin *et al.* (2013), foram produzidos concretos contendo 50% de ARC em associação com materiais cimentícios suplementares. Os traços produzidos foram divididos em 5 grupos:

- Grupo A: um traço contendo somente cimento, um traço contendo 10% de sílica ativa e um traço com 10% de metacaulim, com consistência alcançada com uso de aditivos químicos.
- Grupo B: um traço contendo 50 % de cinzas volantes, e um traço com 50% de fíler calcário, utilizando somente água para atingir a consistência desejada;
- Grupo C: um traço contendo 50 % de cinzas volantes, utilizando somente aditivos químicos para atingir a consistência desejada;
- Grupo D: um traço contendo 0% de cinza volante e 10% de sílica ativa, e um traço contendo 40% de fíler calcário e 10% de sílica ativa, com consistência alcançada com uso de aditivos químicos;

- Grupo E: um traço contendo 0% de cinza volante e 10% de metacaulim, e um traço contendo 40% de filer calcário e 10% de metacaulim, com consistência alcançada com uso de aditivos químicos.

Observou-se para as propriedades mecânicas que os melhores resultados foram para o grupo A, ambos traços com adição ultrapassando os valores do traço de referência. Os traços contendo cinza volante apresentaram uma redução nos valores de propriedades mecânicas em comparação ao traço de referência, sendo que a utilização conjunta de metacaulim e sílica ativa com a cinza volante, elevou ligeiramente os valores em relação aos traços contendo somente cinzas volantes. Os traços contendo filer calcário obtiveram os valores mais baixos para as propriedades mecânicas, apresentando pequeno aumento quando utilizado sílica ativa e metacaulim em conjunto. Quanto a penetração de água sob pressão, os melhores resultados foram para o Grupo A, seguidos pelos traços contendo cinza volante com sílica ativa, cinza volante com metacaulim, somente cinzas volantes, e posteriormente os traços contendo filer calcário.

Kapoor *et al.* (2016) produziram concretos autoadensáveis utilizando ARC em adição de 0%, 50% e 100% em relação ao agregado graúdo comum britado. MCS foram utilizados em substituição parcial ao cimento Portland na mistura, sendo esses cinzas volantes (30%), cinza volante e sílica ativa (20% e 10%, respectivamente), e cinza volante com metacaulim (20% e 10%, respectivamente). Os traços contendo cinza volante com sílica ativa e cinza volante com metacaulim apresentaram aumento na resistência à compressão em relação ao traço referência contendo somente cinza volante. No entanto, a resistência à compressão decresceu com o aumento de ARC na mistura. Para o ensaio de migração de cloretos, a utilização de sílica ativa e de metacaulim levou a redução do parâmetro em comparação ao traço de referência. A profundidade de penetração e a absorção de água aumentaram com a adição de ARC em relação ao agregado britado no concreto, mas diminuiu com a utilização da sílica ativa e do metacaulim.

Shaban *et al.* (2019) avaliaram o efeito de tratamentos nos ARC ao os embeber em pastas com pozolanas, utilizando cinza volante, sílica ativa e nanosílica ativa. Os resultados foram positivos na melhoria das propriedades dos agregados, devido ao fortalecimento da argamassa aderida em suas superfícies. Verificou-se que as pastas com teor de 40% de cinza volante e cimento, e de 3% de nanosílica ativa em conjunto com 4 horas de imersão, geraram redução de absorção de água de 50 e 55%, e aumento da massa específica das partículas de 10 e 11%, respectivamente.

Muduli e Mukharjee (2019) produziram concretos substituindo o agregado graúdo convencional pelo ARC nas proporções de 0%, 50% e 100%, substituindo parcialmente o cimento pelo metacaulim nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Observou-se que a resistência a compressão dos traços reduziu com o acréscimo de ARC. No entanto a adição de metacaulim foi capaz de minimizar o efeito negativo do ARC no concreto. As misturas contendo 50% de ARC e de 10 a 20% de metacaulim alcançaram a resistência proposta para a pesquisa, de 30 MPa. O percentual ótimo de metacaulim testado foi de 15%. Para os ensaios de absorção de água e de volume de vazios, observou-se que com a maior adição de ARC no concreto, aumenta-se também esses parâmetros, devido as próprias características do ARC. Porém a utilização de metacaulim reduz tanto a absorção de água, quanto o volume de vazios.

Muduli e Mukharjee (2020) trabalharam com o ensaio dos traços de concreto para mais parâmetros de durabilidade. O teor de substituição do agregado graúdo convencional pelo ARC foi na proporção de 0%, 50% e 100%, enquanto o cimento foi substituído parcialmente pelo metacaulim nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. A resistência a compressão dos concretos contendo ARC costuma ser reduzida, no entanto, com a utilização de 15% de metacaulim em substituição ao cimento, os efeitos negativos do uso do ARC no concreto se tornaram quase nulos, aumentando a resistência à compressão dos traços. O resultado dos ensaios de ataque ácido e ataque de sulfatos mostrou que o uso de solução acida tem efeito consideravelmente pior no ARC que o ataque por sulfatos, sendo que tais efeitos são minimizados com a utilização de metacaulim. Para os ensaios de carbonatação e de penetração de cloretos dos traços, observou-se o mesmo padrão dos outros resultados, onde ocorre uma piora nos parâmetros com a adição do ARC, porém esta é parcialmente, e muitas vezes totalmente, revertida com a utilização de metacaulim nos traços. Uma análise de difração de raios-x (DRX), revelou que para o concreto contendo 15% de metacaulim os picos de portlandita foram menores comparado ao concreto feito somente com cimento Portland. Tal feito é resultado do consumo do Ca(OH)_2 pelo metacaulim nas reações pozolânicas, que formam mais gel de C-S-H, aumentando a resistência da pasta.

Alqarni *et al.* (2021) utilizaram na produção de concretos ARC nas proporções de 0%, 33%, 67% e 100%, tratados por três diferentes métodos: pasta de cimento com sílica ativa, solução de silicato de sódio e abrasão Los Angeles. No estado fresco, os pesquisadores observaram uma influência negativa nas propriedades dos concretos produzidos com ARC não tratado, em comparação aos três tratamentos aplicados. Os concretos com ARC tratados apresentaram

melhora nos resultados de consistência por abatimento de tronco de cone de 15 até 35% em relação ao traço com ARC não tratado. Para a resistência à compressão e absorção de água, todos os traços produzidos com ARC tratado apresentaram melhora no desempenho quando comparados ao traço com ARC não tratado.

Guo *et al.* (2022) produziram concretos utilizando 100% de ARC em conjunto com cimento LC³, com teores de substituição de 0%, 35% e 50% de LC³ em relação ao cimento Portland convencional. Observaram que para ambos traços com LC³ a resistência à compressão apresentou uma redução, porém não significativa, enquanto a resistência à migração de cloretos apresentou um grande aumento. Os autores verificaram ainda um grande refinamento dos poros dos traços produzidos com conseqüente redução da porosidade dos concretos.

Zhu *et al.* (2022) trataram os ARC utilizados na pesquisa com uma pasta de cimento com sílica ativa, produzindo um traço de concreto com este, e outro traço de concreto com agregado graúdo natural, com método de mistura convencional dos concretos. Os resultados mostraram que o traço produzido com o ARC tratado apresentou valores de resistência à compressão muito próximos ao traço produzido com agregado graúdo convencional. Os pesquisadores verificaram pelas imagens da microscopia eletrônica de varredura que a melhora da qualidade do ARC se deu pela redução da espessura da ZTI, por conta do efeito de preenchimento da pasta de tratamento, bem como por conta do efeito pozolânico da mistura.

Quanto a utilização de nanomateriais, Mukharjee *et al.* (2015) utilizaram nanosílica na produção de concretos contendo ARC e verificou melhora nas propriedades mecânicas estudadas, além de aumento na densidade do material e redução na absorção de água. Shaikh *et al.* (2018) estudaram dois tipos diferentes de abordagem na utilização de NS com ARC, fazendo a colmatação com NS em suspensão, e produzindo traços de concreto com a NS adicionada diretamente na massa. Verificou-se que o ARC submetido ao processo de colmatação prévia obteve um volume menor de poros permeáveis, de absorção de água, e de penetração de íons de cloreto, quando comparados ao concreto que teve a NS adicionada diretamente na mistura. Zeng *et al.* (2020) verificaram que a colmatação do ARC em suspensão de NS por 1 hora fornece alta eficiência melhorando as propriedades dos ARC, pois nesse processo houve melhora nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos ARC, reduzindo e preenchendo a ZTI. Chen e Jiao (2022) trataram os ARC com imersão em solução de nanosílica em concentrações de 0%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%. Os pesquisadores verificaram que o valor ideal de

concentração na solução de nanosílica foi de 2%, apresentando melhora de 20% na resistência à compressão em comparação com o traço de referência.

2.3.2.3 Carbonatação acelerada dos ARC

Outra forma de tratamento dos ARC é por meio da carbonatação acelerada dos agregados. Zhang *et al.* (2015) averiguaram que durante as reações de carbonatação, o CO₂ reage com o Ca(OH)₂ e o silicato de cálcio hidratado para formar CaCO₃ e gel de sílica, que preenche os poros da pasta aderida aos agregados. A carbonatação ainda aumenta a massa específica e reduz a absorção de água dos ARC, além de melhorar a fluidez e a resistência à compressão e reduzir a retração por secagem de argamassas feitas com ARC.

Zhang *et al.* (2015b) viram que o tratamento de carbonatação acelerada nos ARC utilizados para fabricação de argamassas alcançaram valores maiores de retração autógena e valores menores para retração por secagem, absorção de água e coeficiente de migração de cloretos. Ao investigar a zona de transição interfacial (ZTI), constataram que a carbonatação melhorou tanto a zona de transição original do ARC, quanto a nova zona de transição formada na argamassa.

Tam *et al.* (2016) investigaram o uso do ARC carbonatado na produção de concreto, variando a pressão da câmara de carbonatação (0kPa, 75kPa, 150kPa), o tempo em que o ARC foi submetido ao tratamento (0min, 30min, 90min) e os teores de substituição do agregado natural por ARC (0%, 30%, 100%). Os autores concluíram que a submissão dos ARC a pressões mais baixas e/ou maior tempo de permanência na câmara de carbonatação geraram os melhores resultados. O concreto produzido com 30% de ARC carbonatado forneceu valores de desempenho físico e mecânico melhores do que o concreto produzido com agregado natural, enquanto o concreto com 100% de substituição por ARC gerou uma grande quantidade de água livre durante a mistura. A água livre durante a mistura ocorreu por ter sido utilizada a mesma relação água/aglomerante dos traços com ARC não tratados, para os traços com ARC carbonatado. A carbonatação reduz a porosidade do agregado, fazendo com que a água que iria preencher os poros da argamassa antiga aderida ao ARC esteja disponível na nova mistura, aumentando a relação água/ aglomerante do traço.

Xuan *et al.* (2016) trabalharam com dois tipos de agregados reciclados, um de obras de demolições antigas, e um concreto britado novo. Os agregados reciclados foram submetidos a

carbonatação acelerada sob pressão, como tratamento para melhorar suas propriedades. Os traços produzidos nesta pesquisa utilizaram os teores de substituição de agregado graúdo convencional por ARC de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Verificou-se que os ARC submetidos a carbonatação acelerada apresentaram melhoras nas suas características físicas e mecânicas. O ARC antigo apresentou parâmetro de melhora inferior ao ARC mais novo devido a uma carbonatação natural parcial que já tinha ocorrido nos concretos originais. O acréscimo nos concretos de ARC carbonatado, não somente melhorou as propriedades mecânicas do produto, como permitiu que uma quantidade maior de ARC fosse usada na produção dos concretos. Até a porcentagem de 60%, a redução nas propriedades mecânicas dos concretos foi insignificante. Pelo ensaio de microdureza de Vickers da pasta de cimento antiga do ARC mais novo, observou-se que houve um aumento na microdureza desta após o processo de carbonatação dos ARC, principalmente nas zonas de transição interfaciais entre o agregado original e a argamassa antiga aderida sobre este.

Em uma continuação do estudo citado anteriormente, Xuan *et al.* (2017) estudaram as propriedades de durabilidade dos concretos produzidos. A retração por secagem nos concretos produzidos com ARC não tratado foi bem maior em relação aos concretos que continham ARC carbonatado, devido a densificação da microestrutura dos ARC. O processo de carbonatação dos ARC levou a uma redução da absorção de água e da permeabilidade da estrutura como um todo. Tal fator levou a melhora nos parâmetros dos ensaios de resistividade elétrica, penetração de íons de cloreto e penetração de gás.

No estudo de Liang *et al.* (2019) foram utilizados agregados naturais miúdo e graúdo, agregados reciclados miúdos e graúdos, e agregados reciclados carbonatados miúdos e graúdos. Os agregados reciclados apresentaram propriedades melhores após o processo de carbonatação. Os ARC miúdos, por conterem maior quantidade de argamassa aderida, apresentaram mudanças mais significativas após a carbonatação acelerada em comparação ao ARC graúdo. As melhoras se mostraram mais significativas no ensaio de absorção de água do ARC miúdo. Ensaios microestruturais como Difração de Raios-X (DRX), termogravimetria (DTG), e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados nos ARC. Através desses ensaios verificou-se que a carbonatação acelerada proporcionou reações que preencheram os vazios da Zona de Transição Interfacial dos ARC, além de poros e fissuras contidas nestes, melhorando a estrutura da argamassa antiga aderida ao ARC. O concreto produzido com os ARC carbonatados, de forma geral, apresentaram menor permeabilidade à cloretos, em relação aos ARC não

carbonatados. A difusão de cloretos, inclusive, apresentou um decréscimo à medida que a resistência à compressão dos concretos aumentou. Por fim, nesta pesquisa chegou-se à conclusão de que o risco de corrosão em um concreto armado contendo ARC carbonatado é menor em comparação a um concreto com ARC não carbonatado.

Lu *et al.* (2019) trataram os ARC também pela carbonatação acelerada. Após o processo de carbonatação dos ARC, a argamassa aderida foi removida do agregado carbonatado e moída para o ensaio de termogravimetria. Os resultados desse ensaio mostraram picos menores de C-S-H e CH, indicando o consumo desses componentes pelo tratamento por carbonatação. Através dos ensaios, verificou-se que o ARC carbonatado apresentou redução na absorção de água e aumento na densidade aparente, além de que, quanto menor o tamanho do ARC, mais efetivo é o tratamento por carbonatação. Após a carbonatação dos ARC foram produzidos os traços de concreto. Os traços de concreto produzidos continham 0% de ARC, 50% e 100% de ARC não carbonatado, e 50% e 100% de ARC carbonatado. A resistência a compressão dos traços contendo ARC carbonatado foi maior em comparação aos traços contendo ARC não carbonatado, e até mesmo comparáveis ao traço produzido somente com agregados convencionais. A carbonatação dos ARC aumentou a retração autógena dos concretos e reduziu a retração por secagem. Tendo a ZTI como ponto frágil dos ARC, o processo de carbonatação melhorou efetivamente a microdureza da região, reduzindo a porosidade dessa área, tudo devido as reações do CH e o gel de sílica formado pelo processo de carbonatação.

Wang *et al.* (2020) trabalharam em sua pesquisa com a carbonatação dos ARC por dois métodos distintos. O primeiro método, mais simples, levava os ARC secos diretamente para a câmara de carbonatação, até a carbonatação completa destes. O segundo método utilizou a impregnação dos ARC com uma emulsão de hidróxido de cálcio por 60 minutos, deixando estes secarem por 50 minutos, e somente depois levando estes para a câmara de carbonatação até carbonatação completa. Ambos os concretos obtiveram melhora em suas características e desempenhos, mecânico e de durabilidade. O ARC impregnado de hidróxido de cálcio obteve uma argamassa aderida mais compacta após a carbonatação, em relação ao ARC não impregnado. Quanto as ZTI antigas dos ARC, ambos os tratamentos foram efetivos ao preenchê-las e torná-las menos frágeis, corroborando com a melhora no desempenho do concreto produzido.

Li *et al.* (2021) compararam o efeito de cinco tratamentos em ARC, sendo estes: carbonatação pressurizada, carbonatação não pressurizada, carbonatação em meio aquoso dos ARC saturados, spray de suspensão de nanosílica, e spray de suspensão de nanosílica em ARC

carbonatado por pressurização. Foram avaliadas as propriedades dos ARC quanto a propriedades mecânicas, de durabilidade e de microdureza. Os pesquisadores observaram que o ARC tratado com carbonatação pressurizada apresentou melhores resultados em comparação ao tratamento de carbonatação não pressurizada e carbonatação em meio aquoso. O ARC tratado com spray de nanosílica apresentou resultados melhores que os ARC tratados pelos três métodos de carbonatação. O traço que utilizou spray de nanosílica nos ARC carbonatados por pressurização foram os que apresentaram maior eficiência.

Lu *et al.* (2022) carbonataram o ARC à 70°C, acelerando o processo por meio da alta temperatura. Nos ensaios realizados no ARC, verificaram que o hidróxido de cálcio foi totalmente carbonatado nas primeiras 12 horas e a absorção de água do material apresentou uma redução de 23,6%. O concreto produzido com 100% de ARC carbonatado apresentou aos 28 dias de idade um aumento de 14,2% na resistência à compressão em relação ao concreto produzido com ARC não carbonatado.

Dentre todos os trabalhos apresentados previamente, os que foram de suma importância para esta pesquisa estão listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais referências consultadas.

Autor	Ano	% de ARC	Absorção do ARC	Tratamento	Propriedades mecânicas	Durabilidade	Zona de Transição
Tam <i>et al.</i>	2005	0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	3,00 - 7,00%	MMDE	Melhorou	-	Melhorou
Tam e Tam	2008	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	-	MMDE com sílica ativa	Melhorou	-	Melhorou
Kou <i>et al.</i>	2011	0%, 50% e 100%	3,52 - 4,26%	Sílica ativa e metacaulim	Melhorou	Melhorou	-
				Cinza volante e escória de alto forno	Piorou		
Kou e Poon	2012	0%, 20%, 50% e 100%	3,52 - 4,26%	Cinza volante (substituição)	Piorou	Melhorou	-
				Cinza volante (adição)	Melhorou		
Kou e Poon	2013	0%, 20%, 50% e 100%	5,34 - 7,19%	Cinza volante (substituição)	Melhorou	Melhorou	-
Radonjanin <i>et al.</i>	2013	50%	-	Sílica ativa e Metacaulim	Melhorou	Melhorou	-
				Cinzas volantes, fíler calcário	Piorou	Piorou	

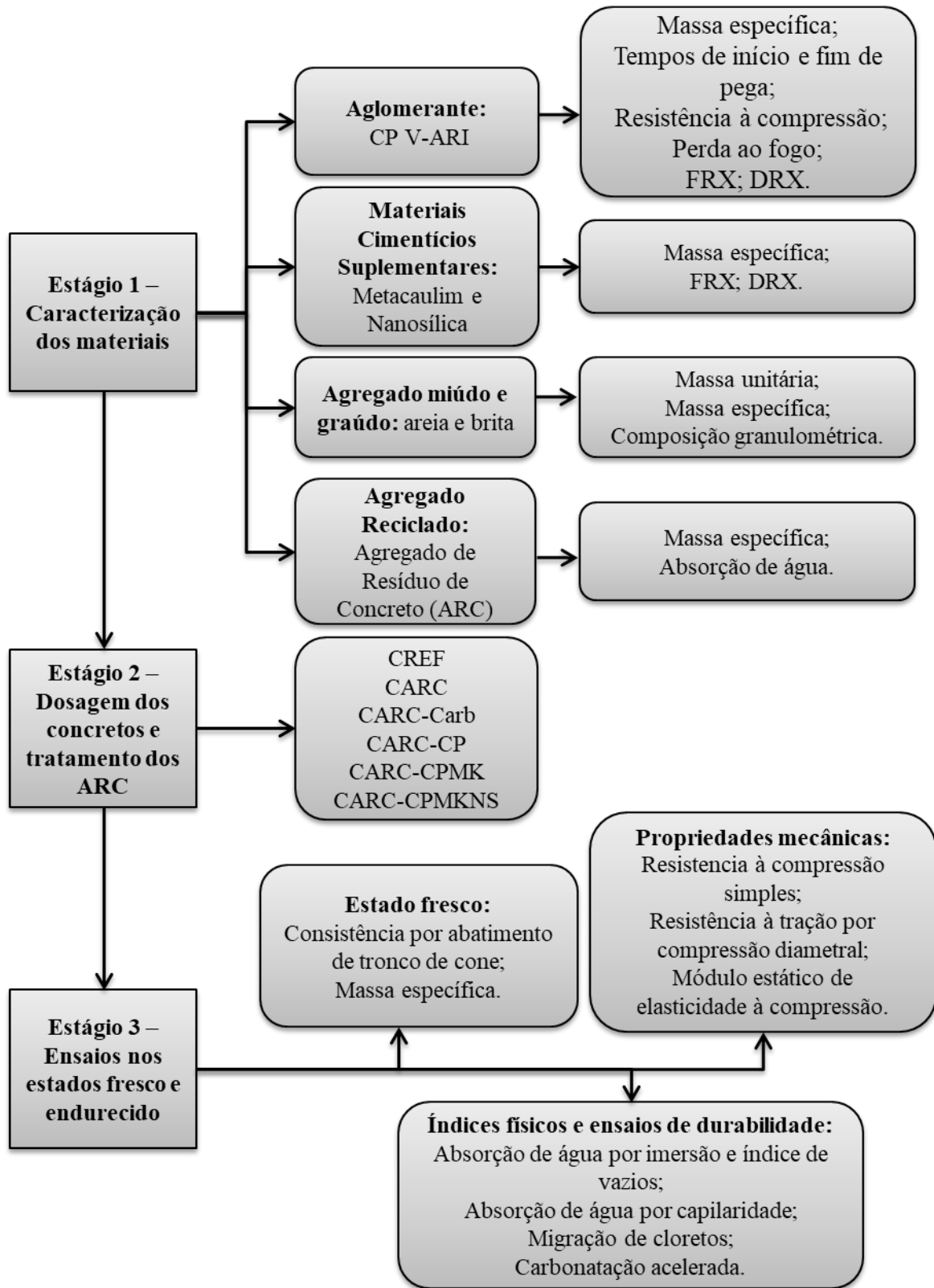
Tam <i>et al.</i>	2016	0%, 30% e 100%	5,00 - 5,63% (n/carb.)	Carbonatação acelerada	Melhorou	-	-
Xuan <i>et al.</i>	2016	0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.	5,50 - 7,20% (n/carb.) 5,10 - 6,40% (carb.)	Carbonatação acelerada	Melhorou	-	Melhorou
Xuan <i>et al.</i>	2017	0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.	5,50 - 7,20% (n/carb.) 5,10 - 6,40% (carb.)	Carbonatação acelerada	-	Melhorou	-
Kapoor <i>et al.</i>	2016	0%, 50% e 100%	5,35%	Cinza volante	Melhorou	Melhorou	
				Cinza volante e sílica ativa	Melhorou	Melhorou	-
				Cinza volante e metacaulim	Piorou	Piorou	
Dimitriou <i>et al.</i>	2018	50% e 100%	3,7 - 7,2%	Remoção mecânica de argamassa	Melhorou	-	-
Liang <i>et al.</i>	2019	100%	-	Carbonatação acelerada	Melhorou	Melhorou	Melhorou
Lu <i>et al.</i>	2019	0%, 50% e 100%	-	Carbonatação acelerada	Melhorou	-	Melhorou
Muduli e Mukharjee	2019	0%, 50% e 100%	4,92%	Metacaulim	Melhorou	Melhorou	-
Muduli e Mukharjee	2020	0%, 50% e 100%	4,92%	Metacaulim	Melhorou	Melhorou	-
Silva e Capuzzo	2020	20%	3,71%	MMDE (25% CP)	Melhorou	Melhorou	
				MMDE (100% CP)	Melhorou (compressão) Piorou (tração/módulo)	Piorou	-

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e procedimentos realizados para o desenvolvimento do programa experimental. O programa experimental foi dividido em três estágios: o estágio 1 abrange a caracterização dos materiais, o estágio 2 envolve a dosagem dos concretos em conjunto com o tratamento dos ARC, e o estágio 3 trata dos ensaios realizados nos concretos, nos estados fresco e endurecido.

Os procedimentos do programa experimental foram realizados majoritariamente no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM-UnB). No Laboratório de Estruturas (LABEST – UnB) foi realizado o ensaio de carbonatação acelerada dos ARC, no Instituto de Química (IQ – UnB) o ensaio de Fluorescência de Raios-x. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma com o programa experimental de forma resumida, e nos itens posteriores são detalhados os três estágios deste trabalho.

Figura 3.1 - Organograma do programa experimental.



Fonte: Elaboração própria

Em pesquisas científicas nas quais se investiga relações de causas e efeitos, como o caso de pesquisas experimentais, ao menos duas variáveis devem ser especificadas previamente, as variáveis independentes e as variáveis dependentes. A variável independente é a condição necessária para se obter determinada resposta, a qual o pesquisador pode manipular diretamente para ver qual o efeito que esta exerce sobre um possível resultado. A variável dependente é consequência de um estímulo, é causada ou influenciada pela variável independente, e não pode ser manipulada diretamente (LEEDY e ORMROD, 2016).

Neste estudo, as variáveis independentes foram os tratamentos superficiais realizados nos ARC (carbonatação, mistura em dois estágios com 25% de cimento Portland e com substituição em massa do cimento Portland por metacaulim, e adição de nanosílica), substituição dos agregados naturais por ARC (teores de 0% e 20%). As variáveis dependentes, que são os resultados da execução do programa experimental são: as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, incluindo a avaliação de propriedades mecânicas e de durabilidade. As variáveis independentes e dependentes estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis dependentes e independentes

Variáveis independentes	Tratamento nos ARC	Sem tratamento	Sem tratamento	MMDE + 25 % CP	MMDE + 25 % CP e MK	MMDE+ 25 % CP e MK + 1% NS	Carbonatação acelerada
	Teor de substituição ARC (%)	0%	20%	20%	20%	20%	20%
Variáveis dependentes	Estado fresco	Consistência por abatimento de tronco de cone					
		Massa específica					
	Propriedades mecânicas	Resistência à compressão simples					
		Módulo estático de elasticidade à compressão					
	Durabilidade	Absorção de água por imersão					
		Absorção de água por capilaridade					
		Migração de cloretos no estado não estacionário					
Carbonatação acelerada							

Fonte: Elaboração própria

A quantidade de corpos de prova produzidos neste estudo está apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova produzidos.

Ensaio	Amostras por idade	Idades	Traços	Total	Dimensões¹ (mm)	Nº CPs por traço
Resistência à compressão simples	3	5	6	90	100 x 200	15
Módulo estático de elasticidade à compressão	3	1	6	18	100 x 200	3
Absorção de água por capilaridade	3	1	6	18	100 x 200	3
Absorção de água por imersão	3	1	6	18	100 x 200	3
Migração de cloretos no estado não estacionário e teor de cloretos	2	2	6	24	100 x 200	4
Carbonatação acelerada	1	2	6	12	100 x 100 x 400	2

Obs.¹: Os corpos de prova produzidos foram em formato cilíndrico, com exceção do corpo de prova para o ensaio de carbonatação, produzido em formato prismático.

Fonte: Elaboração própria

3.1 MATERIAIS

Para a produção do concreto com ARC foram utilizados materiais disponíveis na região do Distrito Federal e entorno. A seguir são descritos os materiais utilizados para pesquisa e os métodos de caracterização utilizados para cada um.

3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI). Este cimento é a opção comercial mais pura encontrada, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) possui o maior teor de clínquer em comparação com outros cimentos, podendo ter até 10% de adição de material carbonático. Os métodos de ensaio utilizados na caracterização do aglomerante estão apresentados na Tabela 3.3, incluindo a caracterização através da espectroscopia por fluorescência de raios-x (FRX) e análise das fases cristalinas pela difração de raios-x (DRX).

Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização do cimento Portland.

Caracterização	Método de ensaio
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Tempos de início e fim de pega	NBR NM 65 (ABNT, 2003)
Resistência a compressão simples	NBR 7215 (ABNT, 1997)
Perda ao fogo	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
FRX	NBR 14656 (ABNT, 2012)
DRX	-

Fonte: Elaboração própria

Os resultados da caracterização física do aglomerante utilizado, cimento Portland de alta resistência inicial (CP V- ARI), bem como sua caracterização química por meio dos ensaios de espectrometria por fluorescência de raio-X (FRX) e difratometria de raios-X (DRX), estão dispostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Caracterização física do aglomerante.

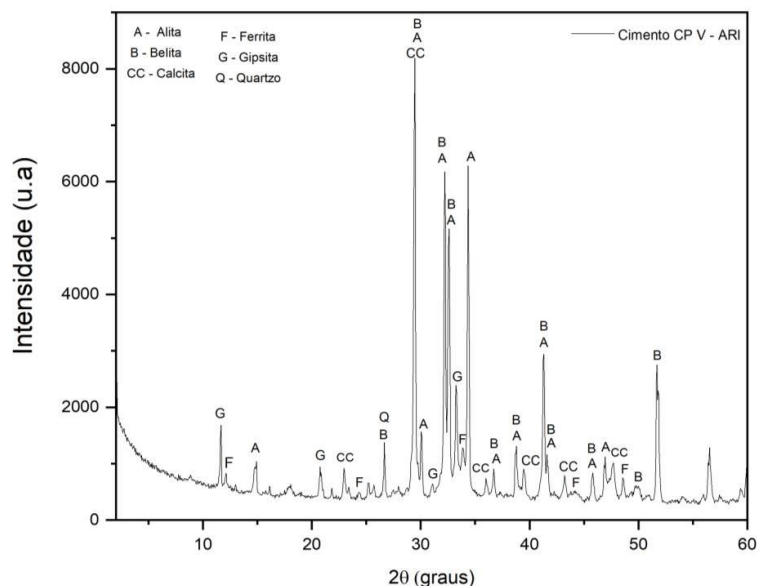
Propriedades	Resultado	Limites*	Método de ensaio	
Tempo de início de pega (horas)	02:28	≥ 1	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	
Tempo de fim de pega (horas)	03:33	≤ 10		
Massa específica (g/cm ³)	3,00	-	NBR 16605 (ABNT, 2017)	
Resistência à compressão (Mpa)	1 dia	≥ 14	NBR 7215 (ABNT, 1997)	
	3 dias	≥ 24		
	7 dias	≥ 34		
Perda ao fogo (%)	6,13	$\leq 6,5$	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	
Composição química, em óxidos (%)	CaO	72,25	N.E.	
	SiO ₂	15,04	N.E.	
	Al ₂ O ₃	3,89	N.E.	
	SO ₃	3,71	$\leq 4,5$	
	Fe ₂ O ₃	3,02	N.E.	NBR 14656 (ABNT, 2012)
	MgO	0,88	$\leq 6,5$	
	SrO	0,47	N.E.	
	TiO ₂	0,35	N.E.	
	K ₂ O	0,33	N.E.	
	MnO	0,07	N.E.	
ZnO	0,01	N.E.		

*Limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018);
N.E. = limite não estabelecido.

Fonte: Elaboração própria

O ensaio de DRX forneceu de forma qualitativa os materiais constituintes da amostra analisada, por meio de picos de intensidade distintas, o resultado está na Figura 3.2

Figura 3.2 - Difratoograma de raios-x do aglomerante.



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Materiais cimentícios suplementares

Para a realização dos tratamentos dos ARC, foram utilizados como MCS o metacaulim (MK) e a nanosílica (NS). Nesta pesquisa foi utilizado o metacaulim doado pela Metacaulim do Brasil e a nanosílica Levasil CB45 A, com 15% de teor de sólidos, doada pela empresa Nouryon. A caracterização do MK e da NS foi feita pelos métodos de ensaio apresentados na Tabela 3.5, incluindo FRX e análise das fases cristalinas pelo DRX. Algumas informações da NS foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5 - Ensaio de caracterização dos materiais cimentícios suplementares.

Caracterização	Método de ensaio
Massa específica*	NBR 16605 (ABNT, 2017)
FRX	NBR 14656 (ABNT, 2012)
DRX	-

* A massa específica foi determinada somente para o MK

Fonte: Elaboração própria

A caracterização química tanto do metacaulim, quanto da nanosílica realizada pelo ensaio de fluorescência de raio-X (FRX) está disposta na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Caracterização química do MK e da NS por FRX.

Propriedades	Resultado		Método de ensaio
	MK	NS	
Perda ao fogo (%)	2,6	20,66	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
Composição química, em óxidos (%)	CaO	-	0,07
	SiO ₂	54,55	93,77
	Al ₂ O ₃	38,73	4,20
	SO ₃	0,07	0,16
	Fe ₂ O ₃	2,95	0,06
	MgO	-	-
	SrO	0,01	-
	TiO ₂	1,70	-
	K ₂ O	1,78	0,10
	MnO	0,02	-
	ZnO	0,01	-
	Na ₂ O	-	1,63
	Outros	-	0,02

Fonte: Elaboração própria

A massa específica obtida para o metacaulim foi de 2,54 g/cm³. As propriedades químicas e físicas da nanosílica fornecidas pelo próprio fabricante estão apresentadas na Tabela 3.7.

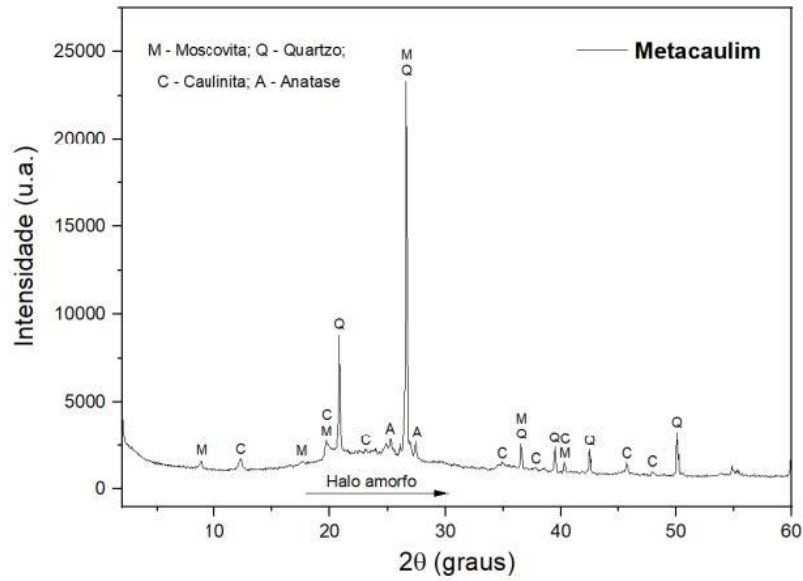
Tabela 3.7 - Propriedades da nanosílica.

Nanosílica Levasil CB45 A	
Estado físico	Líquido
Cor	Claro/turvo
pH	9,5
Densidade relativa (g/cm ³)	1,050 – 1,400
Solubilidade em água	Dispersível
Viscosidade dinâmica	< 50 mPa.s em 20 °C

Fonte: Nouryon (2019).

Ressalta-se que o valor de densidade utilizado foi o valor médio dos valores fornecidos pelo fabricante. Foi realizado também o ensaio de DRX para ambos os materiais, MK e NS. O resultado obtido para o metacaulim está na Figura 3.3.

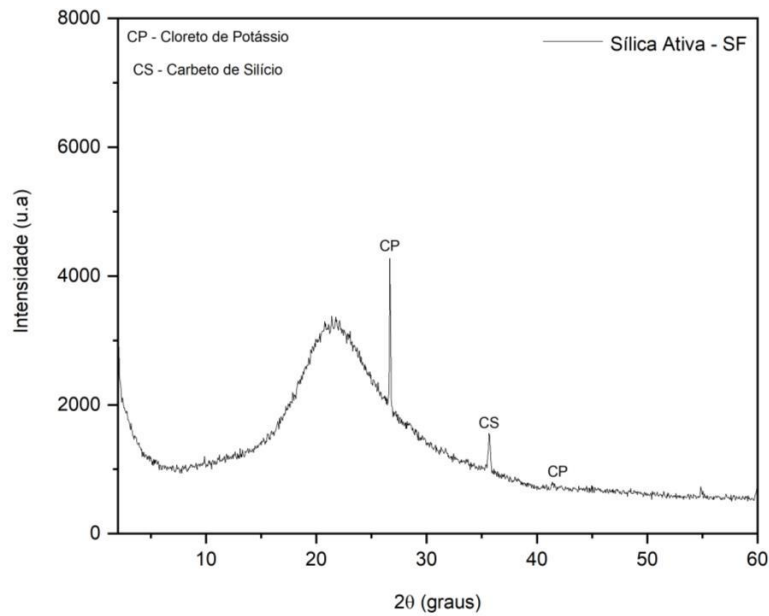
Figura 3.3 - Difratoograma de raios-x do metacaulim.



Fonte: Elaboração própria

Para a nanosílica, Figura 3.4, não há material cristalino para as fases de interesse no material, mostrando um material totalmente amorfo.

Figura 3.4 - Difratoograma de raios-x da nanosílica.



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo selecionado para a composição da dosagem foi a areia quartzosa natural lavada de rio obtida na região. Os métodos de ensaio utilizados na caracterização do agregado miúdo natural estão dispostos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo natural.

Caracterização	Método de ensaio
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Elaboração própria

A caracterização do agregado miúdo e a normatização seguida estão dispostas na Tabela 3.9.

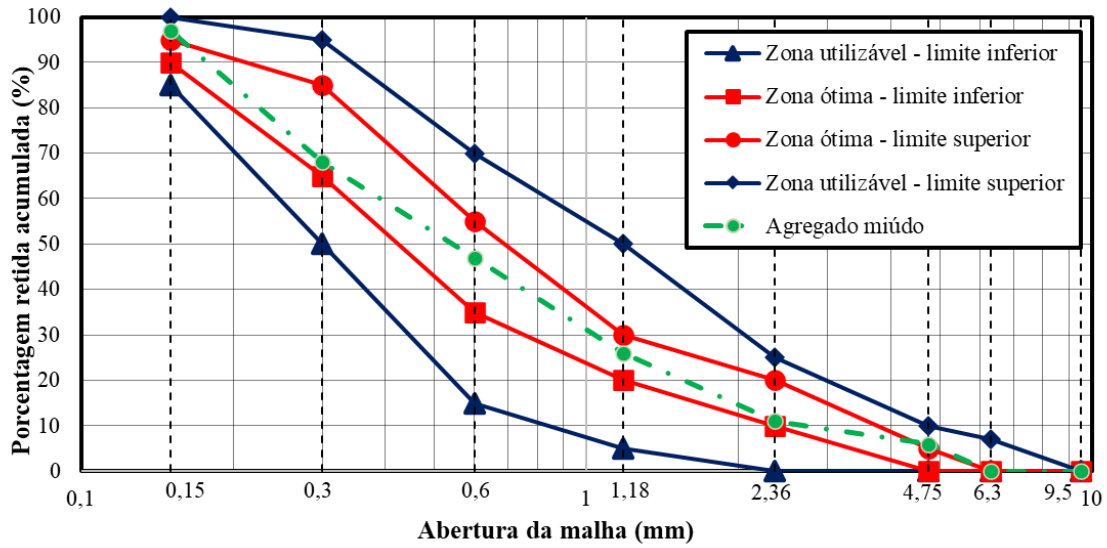
Tabela 3.9 - Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,59	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,47	
Módulo de Finura	2,6	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão Máxima (mm)	4,75	
Absorção de água (%)	0,35	NBR NM 30 (ABNT, 2001)

Fonte: Elaboração própria

A curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Figura 3.5. Observa-se que a curva de distribuição granulométrica do material selecionado para a pesquisa está localizada entre as zonas ótimas de distribuição granulométrica definidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 3.5 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Agregado graúdo britado

Para esta pesquisa, o agregado graúdo escolhido foi o agregado proveniente da britagem de rocha calcária calcítica. A dimensão máxima do agregado foi de 12,5 mm. O agregado britado foi seco em estufa previamente à utilização nos ensaios de caracterização e à produção do concreto. Na Tabela 3.10 são apresentados os métodos de ensaio utilizados na caracterização do agregado graúdo britado.

Tabela 3.10 - Ensaios de caracterização do agregado graúdo britado.

Caracterização	Método de ensaio
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 53(ABNT, 2009)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Elaboração própria

A caracterização do agregado graúdo e a normatização seguida estão dispostas na Tabela 3.11.

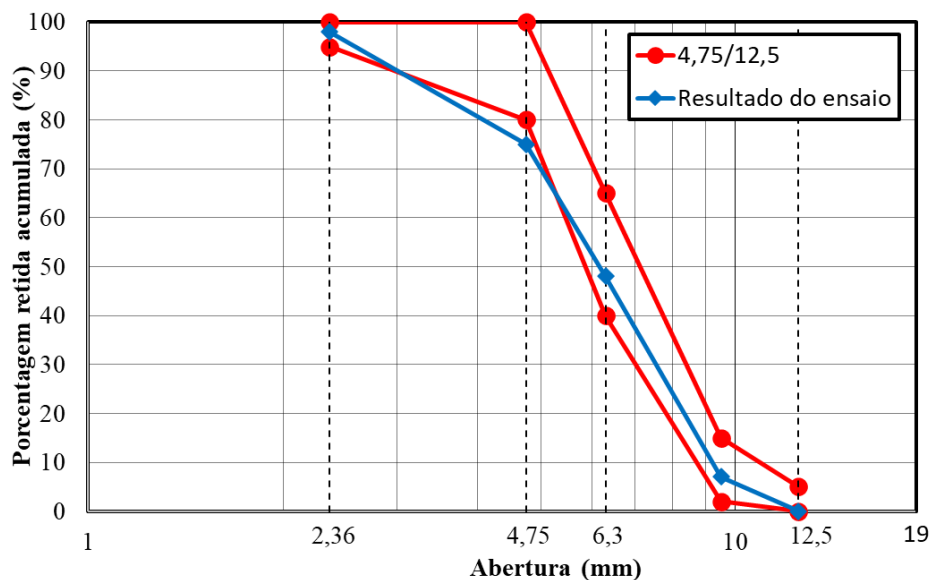
Tabela 3.11 - Caracterização do agregado graúdo.

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,73	NBR NM 53 (2009)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,63	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,51	
Módulo de Finura	5,87	NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima (mm)	12,5	
Absorção de água (%)	0,45	NBR NM 53 (2009)

Fonte: Elaboração própria

A curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo está apresentada na Figura 3.6. O agregado se encontra entre as faixas 4,75 – 12,5.

Figura 3.6 - Curva granulométrica do agregado graúdo britado.



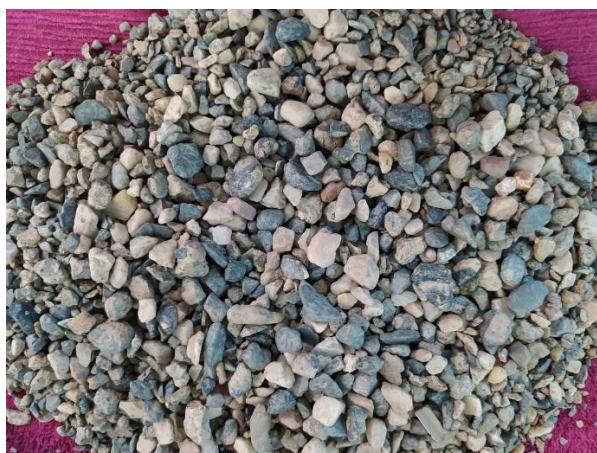
Fonte: Elaboração própria

3.1.5 Agregado reciclado de resíduo de concreto

Sendo o foco da pesquisa, o agregado de resíduo de concreto (ARC) escolhido foi procedente do fornecedor Areia Bela Vista, com localização em Sobradinho, no Distrito Federal, Figura 3.7. A utilização do ARC foi feita em substituição parcial do agregado graúdo natural na

proporção de 20% em volume. A substituição foi feita levando em consideração a distribuição granulométrica do agregado graúdo britado, de forma que a substituição fosse feita proporcionalmente às faixas granulométricas. Os métodos de ensaio realizados estão dispostos na Tabela 3.12.

Figura 3.7 - Agregado reciclado de concreto utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 3.12 - Ensaio de caracterização do agregado de resíduo de concreto.

Caracterização	Método de ensaio
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaboração própria

O resultado da caracterização do agregado reciclado de concreto está apresentado na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Caracterização física do agregado reciclado de concreto.

Propriedades	Massa específica (g/cm³)	Absorção de água (%)
ARC	2,58	3,46

Fonte: Elaboração própria

A determinação da curva granulométrica do agregado reciclado de concreto não foi necessária, pois a substituição do ARC em relação ao agregado graúdo natural foi feita conforme a composição granulométrica do agregado graúdo natural britado.

3.1.6 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada na produção do concreto foi a fornecida pela companhia de abastecimento público de água local.

3.1.7 Aditivo superplastificante

Uma das formas de reduzir a quantidade de água de amassamento do concreto mantendo sua trabalhabilidade é com a utilização de aditivos superplastificantes. Neste trabalho foi usado o aditivo superplastificante Glenium 51 com cadeia de éter policarboxílico modificado, contendo 30% de sólidos na dispersão. Esse aditivo atua dispersando as partículas de cimento, deixando o concreto mais plástico, permitindo alta redução de água, sem alterar o tempo de pega. As características desse aditivo foram fornecidas pelo fabricante.

O aditivo superplastificante escolhido para esta pesquisa foi o Master Glenium® 51. Este aditivo é considerado de terceira geração, sendo à base de éter policarboxílico, e foi doado para a pesquisa pela empresa BASF. As propriedades do aditivo foram fornecidas pelo próprio fabricante, e estão dispostas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Propriedades Master Glenium® 51.

Aditivo superplastificante	Master Glenium® 51
Base química	Éter policarboxílico
Dosagem recomendada (%)	0,2 a 1,0
Aparência	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107
pH	5,0 – 7,0
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5
Viscosidade (cps)	< 150

Fonte: BASF, 2019.

3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Nesta pesquisa, optou-se por produzir concreto convencional, no qual foram fixados a relação água cimento de 0,50 e a consistência por abatimento de tronco de cone de 150 ± 10 mm. A consistência por abatimento de tronco de cone foi mantida nesse valor devido à rápida perda de

consistência dos concretos contendo ARC, que pode atrapalhar o processo de moldagem dos corpos de prova.

Foi utilizado o traço piloto intermediário, com proporção de aglomerante/agregado de 1,0:5,0. O teor de argamassa foi obtido experimentalmente para o traço piloto, obtendo o teor de 53% de argamassa, o qual foi fixado para os demais traços. O teor de aditivo superplastificante foi feito individualmente para cada traço, padronizando a consistência da mistura no estado fresco. Essa padronização foi feita para tornar mais evidente o efeito da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado tratado.

Foram produzidos seis diferentes traços de concreto: concreto referência contendo somente agregado graúdo britado (CREF); concreto referência com ARC (CARC), sem tratamento no ARC; concreto com ARC tratado com MMDE utilizando somente cimento Portland (CARC-CP); concreto com ARC tratado com MMDE utilizando cimento Portland e metacaulim (CARC-CPMK); e concreto com ARC tratado com MMDE utilizando cimento Portland, metacaulim e nanosílica (CARC-CPMKNS); concreto com o ARC tratado com carbonatação acelerada (CARC-Carb). Na Tabela 3.15 está disposta a nomenclatura definida para cada traço, assim como suas respectivas características.

Tabela 3.15 - Nomenclatura e características dos traços.

Nomenclatura	Características dos traços
CREF	Concreto de referência (sem ARC)
CARC	Concreto com 20% de ARC sem tratamento
CARC-CP	Concreto com 20% de ARC e MMDE com 25% de cimento Portland
CARC-CPMK	Concreto com 20% de ARC e MMDE com 25% da Composição CPMK, de cimento Portland e Metacaulim
CARC-CPMKNS	Concreto com 20% de ARC e MMDE com 25% da Composição CPMK, de cimento Portland e Metacaulim, mais 1% de Nanosílica
CARC-Carb	Concreto com 20% de ARC carbonatado

Fonte: Elaboração própria

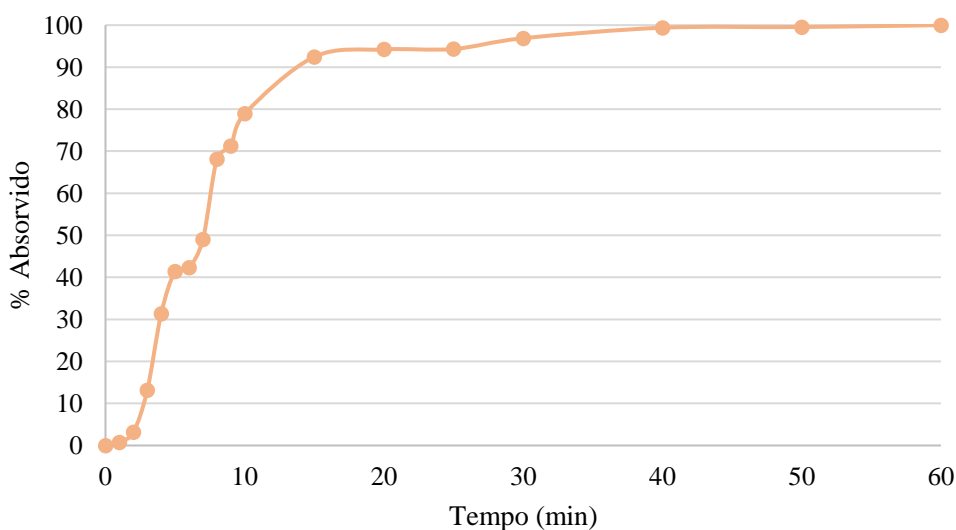
A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado foi feita no teor de 20% em volume, em relação ao agregado graúdo britado. A porcentagem de 20% foi escolhida devido a este ser o teor máximo permitido de substituição do agregado graúdo por ARC na produção de concretos estruturais em diversos países (Kiouranis *et al.*, 2016; Silva, 2019). A substituição pelo ARC foi feita seguindo a granulometria do agregado graúdo britado, ou seja, a substituição do agregado graúdo britado pelo ARC foi feita de acordo com a quantia de material retido em

cada faixa granulométrica. Esse procedimento para substituição busca manter o fator de empacotamento entre as partículas do concreto com ARC semelhante ao do concreto sem ARC.

3.2.1 Determinação curva de absorção de água dos ARC

Ao se trabalhar com ARC, devido à sua grande porosidade, deve-se considerar sua alta absorção de água. Por conta da alta porosidade do material e da possibilidade de perda de material por desagregação do material, os ensaios convencionais de determinação de absorção de agregados miúdos e gráudo não puderam ser utilizados para o ARC. Devido a isso, utilizou-se como base o método proposto por Leite (2001), no qual a absorção foi determinada de forma contínua com auxílio de uma balança hidrostática e um recipiente de malha fina. O ARC foi submerso envolto da malha, para que a água pudesse entrar e o ar sair, mas não se perdessem as partículas do agregado. O ensaio foi feito por 60 minutos, tempo no qual observou-se a constância de massa. Verificou-se que aos 20 minutos em contato com a água o ARC atingiu mais de 90% de sua absorção total, como pode ser verificado no gráfico apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Curva de absorção de água dos ARC



Fonte: Elaboração própria

Para que a água não fosse absorvida pelo ARC, sendo desviada do processo de hidratação da pasta de cimento e influenciando as propriedades do concreto, 100% da água equivalente à quantia a ser absorvida foi somada na dosagem. E para que não ocorresse o desvio da água de

hidratação da pasta para o interior da argamassa do ARC, foi realizada a pré-molhagem do ARC. O processo de pré-molhagem nesta pesquisa foi realizado por 20 minutos antecedendo à concretagem. O período de 20 minutos foi definido através do ensaio de absorção do ARC, verificando a porcentagem de absorção de água ao decorrer do tempo.

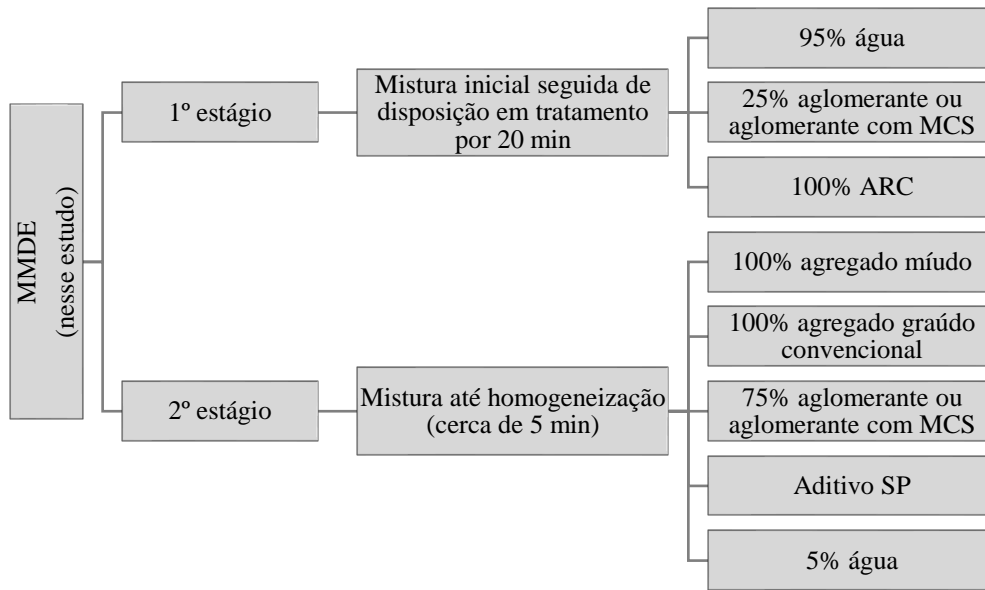
3.2.2 Tratamentos e produção dos traços

Para três dos seis traços produzidos, foi aplicado o tratamento superficial dos ARC pelo método de mistura em dois estágios (MMDE), em conjunto com a utilização de aglomerante e de MCS. O MMDE foi adaptado das metodologias de Tam e Tam (2008) e de Silva (2019). Quando a produção do concreto é feita seguindo o MMDE, o processo de tratamento do ARC é feito durante o próprio processo de produção do concreto. Em relação ao concreto de referência, o que muda na mistura é a ordem em que os materiais são dispostos.

Como o próprio nome diz, o MMDE é dividido em dois estágios. Nesta pesquisa, no primeiro estágio da mistura foram adicionados na betoneira 95% de toda a água de amassamento, deixando água suficiente somente para fazer a correção da água que foi acrescentada pelo SP. Com a água na betoneira, foram adicionados 25% do aglomerante, ou aglomerante com MCS, dependendo do traço, sendo feita uma breve mistura com duração de aproximadamente 1 minuto para homogeneização da pasta. A porção de 25% foi definida por Silva (2019) como mais eficiente para o tratamento do ARC, em relação a usar 100% do total de aglomerante. Silva (2019) afirma que ao utilizar 100% do aglomerante a pasta de tratamento fica muito densa, não adentrando adequadamente dentro dos poros da argamassa aderida ao agregado original do ARC. Por último, o ARC foi adicionado e foi feita uma breve mistura deste com a pasta. O ARC ficou submerso na pasta por 20 minutos, em processo de tratamento.

O segundo estágio do MMDE se iniciou ao final do processo de tratamento do ARC. Nesta etapa foi dada continuidade à mistura, adicionando o agregado miúdo e o agregado graúdo, e o restante do aglomerante, ou aglomerante com MCS. A mistura foi realizada adicionando-se aos poucos o aditivo SP para ajustar a consistência do concreto. Por fim, foi descontada a quantidade de água presente no SP dos 5% de água restante, e esta foi adicionada à mistura. Na Figura 3.9 está esquematizado o processo de produção dos concretos pelo MMDE.

Figura 3.9 – Processo de mistura utilizando o MMDE deste estudo

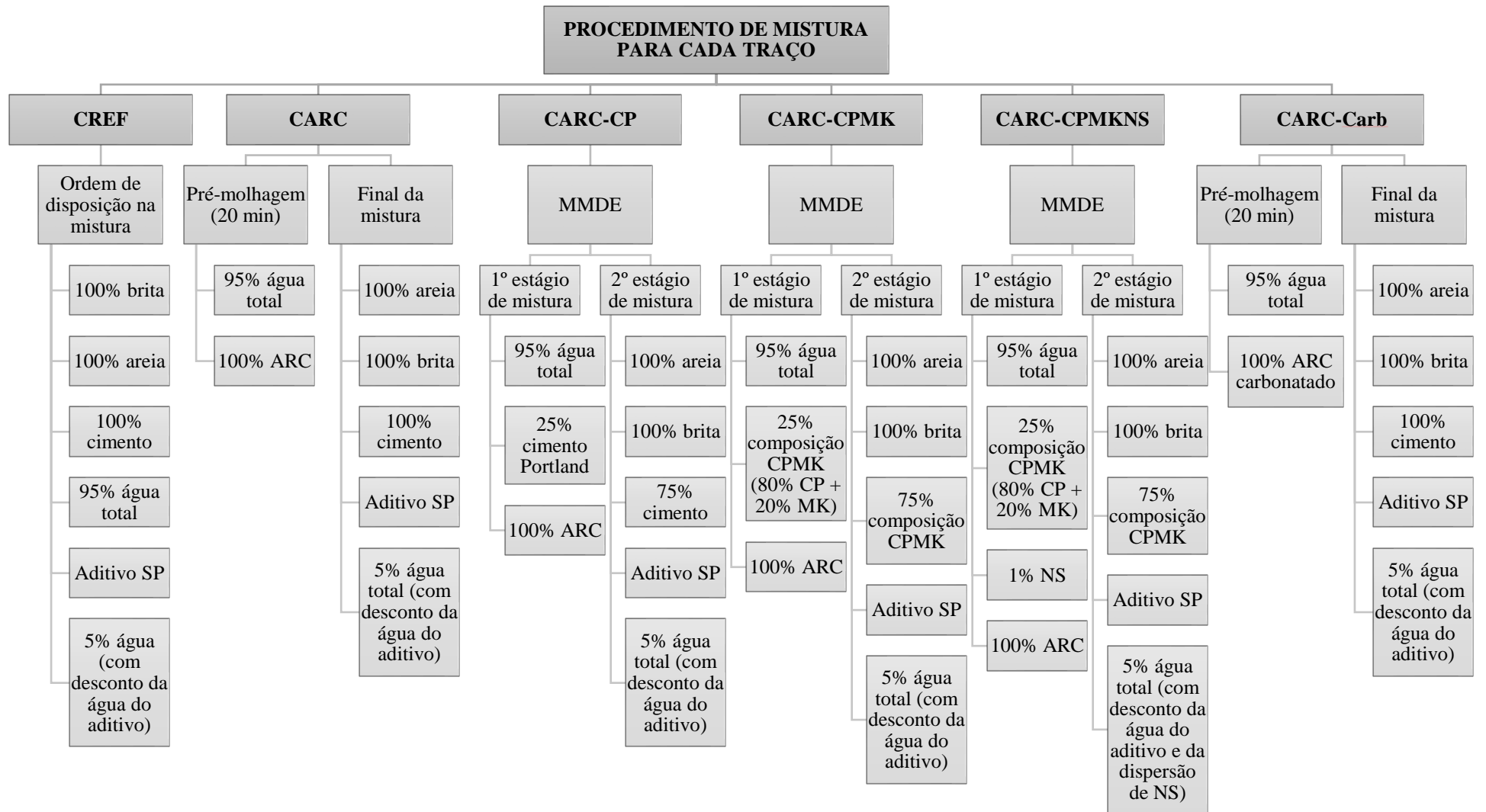


O procedimento de mistura, com cada tratamento realizado para cada traço individualmente está apresentado na Figura 3.10.

Para o traço de referência, CREF, a mistura foi feita colocando na betoneira os materiais na seguinte ordem: brita (100%), areia (100%), cimento Portland (100%), água total (95%), aditivo superplastificante (SP), água total (5%). Com exceção do aditivo SP e dos 5% finais da água, os materiais foram adicionados à betoneira e misturados até homogeneização. O aditivo SP foi adicionado aos poucos até que o concreto atingisse o abatimento pré-definido para todos os traços. Foi então adicionado o restante da água total, abatendo do valor a quantidade de água inclusa no aditivo SP. O tempo final de mistura foi mantido em aproximadamente de cinco minutos.

No traço CARC, como este possuía ARC, foi feito inicialmente o processo de pré-molhagem do ARC. Portanto, foi adicionado na betoneira 95% da água total e o ARC, que permaneceu em processo de pré-molhagem por 20 minutos. Após este processo, deu-se continuidade na mistura com o acréscimo da areia (100%), da brita (100%) e do cimento (100%). O aditivo SP foi adicionado aos poucos até obtenção da consistência definida previamente. E por fim foi adicionado o restante da água total (5%), descontando a água do aditivo SP.

Figura 3.10 – Procedimentos de mistura para cada traço



Quanto aos traços produzidos pelo MMDE, no 1º estágio de mistura foi realizado o tratamento dos ARC em uma pasta constituída da água total (95%) e de 25% da quantia total de cimento Portland, 25% da composição CPMK, e 25% da composição CPMK com adição de 1% de NS, respectivamente para os traços CARC-CP, CARC-CPMK e CARC-CPMKNS. Os ARC foram mantidos na pasta de tratamento por 20 minutos, período determinado como de pré-molhagem e de absorção do ARC. Ao fim dos 20 minutos foi dado prosseguimento ao 2º estágio de mistura. Foi adicionado à betoneira a areia (100%), a brita (100%) e o cimento ou a Composição CPMK (75%). O aditivo SP foi adicionado aos poucos até obtenção da consistência definida previamente. E por fim foi adicionado o restante da água total (5%), descontando a água do aditivo SP e da NS.

Ressalta-se que a substituição de 20% do cimento pelo MK, em massa, foi feita de acordo com os resultados obtidos por Miranda (2018). Portanto a Composição CPMK foi composta de 80% de cimento Portland e 20% de metacaulim.

O último método de tratamento envolveu a carbonatação acelerada dos agregados reciclados. O processo de carbonatação acelerada iniciou-se com a montagem da composição dos ARC por faixa granulométrica. O material foi homogeneizado, sendo posteriormente disposto na câmara de carbonatação em uma fina camada, para que o CO₂ alcançasse todos os grãos de ARC. Os parâmetros de controle da câmara de carbonatação acelerada foram definidos conforme recomendações da ISO 1920-12 (2015). A concentração de dióxido de carbono no interior da câmara foi de $3,0 \pm 0,5$ % por volume, a temperatura de 27 ± 2 °C e a umidade relativa de 65 ± 5 %. O ARC permaneceu em processo de carbonatação por 45 dias. Aos 45 dias, uma amostra do ARC foi retirada da câmara de carbonatação, partida ao meio e foi aplicada solução de fenolftaleína, testando se a carbonatação do agregado havia ocorrido na parte mais superficial da argamassa aderida, colmatando esta, Figura 3.11. Subsequentemente, o processo de carbonatação foi interrompido e o ARC foi levado diretamente para a produção dos traços de concreto.

Figura 3.11 - Teste de carbonatação do ARC com solução de fenolftaleína.

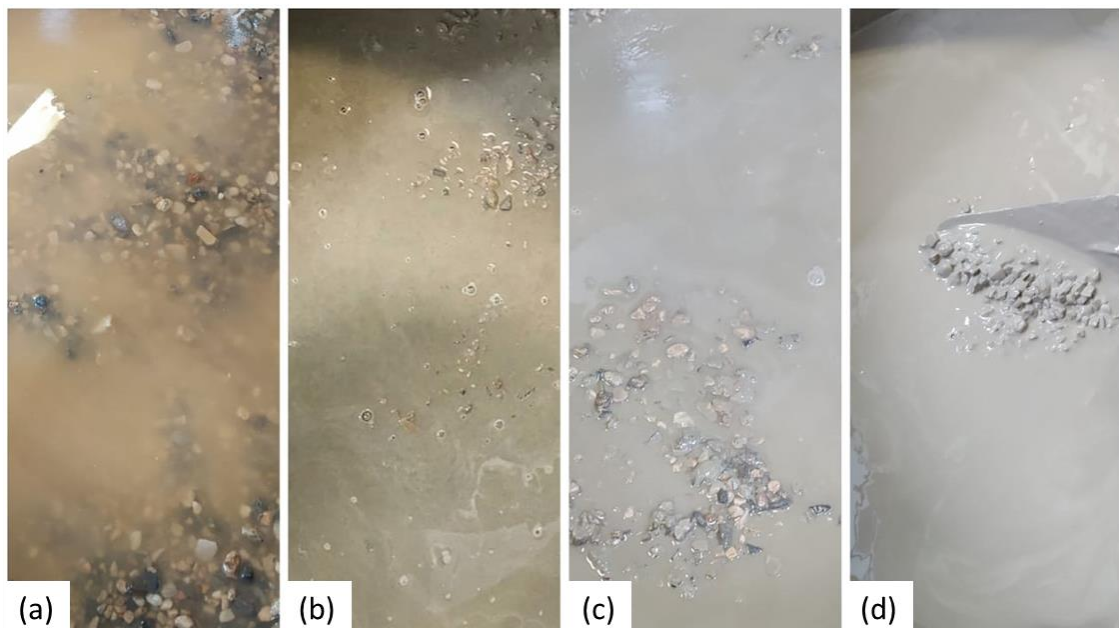


Fonte: Elaboração própria

Na produção do traço CARC-Carb, foi feito inicialmente o processo de pré-molhagem do ARC. No entanto considerou-se a absorção do ARC não carbonatado por limitações em repetir o ensaio para o ARC carbonatado. Foi adicionado na betoneira 95% da água total e o ARC carbonatado, que permaneceu em processo de pré-molhagem por 20 minutos. Após este processo, deu-se continuidade na mistura com o acréscimo da areia (100%), da brita (100%) e do cimento (100%). O aditivo SP foi adicionado aos poucos até obtenção da consistência definida previamente. E por fim foi adicionado o restante da água total (5%), descontando a água do aditivo SP.

Na Figura 3.12 é possível visualizar o processo de pré-molhagem dos ARC nos traços CARC (a), CARC-CP (b), CARC-CPMK (c), CARC-CPMKNS (d).

Figura 3.12 - Pré- molhagem dos ARC dos traços (a) CARC, (b) CARC-CP, (c) CARC-CPMK, e (d) CARC-CPMKNS.



Fonte: Elaboração própria

Percebe-se pela Figura 3.6 que ao incrementar a mistura com cimento, depois com cimento e MK, e por último com cimento, MK e NS, a pasta de tratamento se torna mais densa. O MK e a NS são materiais de menor tamanho de partícula e maior área superficial em relação ao cimento. Sabe-se que ao aumentar o teor de materiais finos em uma mistura, por aumentar a área superficial total dos materiais na mistura, a mistura vai demandar mais água. Para que não houvesse alterações na relação a/c definida previamente, foi feito o ajuste da consistência dos traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS com maior utilização de aditivo superplastificante.

Como dito previamente, para produção de concretos contendo ARC foi necessário levar em consideração a água de absorção total do ARC, determinada através do ensaio de absorção de água. Para a produção do traço, foi considerado a água total da relação água cimento definida, mais o valor total de absorção de água do ARC, que foi de 3,43%. Desta forma, a relação água cimento efetiva foi de 0,50 para 0,52. Da água total foi abatida a quantidade de água contida no aditivo superplastificante e na dispersão de nanosílica, quando utilizada. Na composição dos traços de concreto produzidos, considerou-se a massa específica dos agregados utilizados. As proporções das misturas dos diferentes traços produzidos estão apresentadas na Tabela 3.16, adequando as porções de materiais para cada tipo de substituição.

Tabela 3.16 - Quantitativo de material de cada traço em kg/m³.

Traço	Água efetiva		Água total ¹		Cimento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	NS ² (kg/m ³)	Agregado graúdo britado (kg/m ³)	ARC (kg/m ³)	Areia Natural (kg/m ³)	SP (%) ³	SP (kg/m ³) ⁴
	(kg/m ³)	a/agl	(kg/m ³)	a/agl								
CREF	184,6	0,50	184,6	0,50	369,2	-	-	1041,2	-	804,9	0,35	0,39
CARC	184,6	0,50	192,0	0,52	369,2	-	-	833,0	196,8	804,9	0,40	0,44
CARC-CP	184,6	0,50	192,0	0,52	369,2	-	-	833,0	196,8	804,9	0,40	0,44
CARC-CPMK	184,6	0,50	192,0	0,52	295,4	73,8	-	833,0	196,8	804,9	1,08	1,2
CARC-CPMKNS	184,6	0,50	192,0	0,52	295,4	73,8	3,7	833,0	196,8	804,9	1,78	1,97
CARC-Carb	184,6	0,50	192,0	0,52	369,2	-	-	833,0	196,8	804,9	0,46	0,51

Obs. 1: Quantidade de água total, considerando 100% de absorção do ARC; Obs. 2: Massa de sólidos de nanosilica; Obs. 3: Porcentagem de superplastificante em dispersão; Obs. 4: Quantidade de sólidos de superplastificante.

Fonte: Elaboração própria

3.3 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

3.3.1 Massa específica

A massa específica dos diferentes traços de concreto produzidos foi obtida por meio do preenchimento de um recipiente de volume conhecido. O preenchimento foi realizado em duas camadas de concreto, sendo cada camada adensada por meio de um vibrador, este vibrador não ultrapassando os limites das camadas. Após o preenchimento, o recipiente foi rasado e limpo externamente e a massa de material contido no recipiente foi aferida de acordo com as orientações da NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Após a produção dos traços de concreto, os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de dimensões 100x200 mm. Os moldes foram revestidos com uma fina camada de óleo lubrificante não reagente com cimento para facilitar o desmolde. Os moldes foram preenchidos em uma única camada adensada mecanicamente, de acordo com as instruções da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova ficaram cobertos por 24 horas com placas de vidro, minimizando a perda de água para o ambiente que é destinada à hidratação, tanto do cimento Portland, quanto dos MCS. Após 24 horas de cura ao ar, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida para processo de cura úmida até as idades de realização dos ensaios. Previamente à realização dos ensaios, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e foram retificados, tendo as suas extremidades uniformizadas.

Ressalta-se que algumas datas de ensaio tiveram que ser modificadas devido à interferência no calendário de atividades causado pela pandemia de COVID-19.

3.4.1 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados nas idades de 1, 3, 7, 28 e 253 dias, seguindo o procedimento da NBR 5739 (ABNT, 2018). A última data de ensaio foi adiada por conta da pandemia. Os corpos de prova foram rompidos na prensa com aplicação de força gradativa até atingir o rompimento total do corpo de prova.

3.4.2 Módulo estático de elasticidade à compressão

O ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado aos 28 dias, seguindo as instruções da NBR 8522 (ABNT, 2017). Foram produzidos três corpos de prova por traço, deixados em cura úmida até a realização dos ensaios. Os resultados deste ensaio foram determinados automaticamente pelo programa utilizado em conjunto com a prensa.

3.5 ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

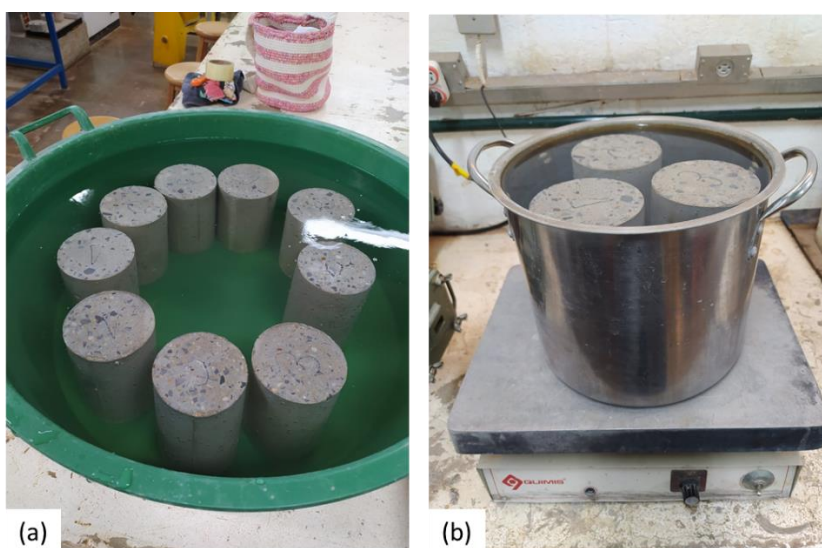
Os corpos de prova utilizados nos ensaios de durabilidade foram moldados em formas cilíndricas de dimensões 100x200 mm, com exceção dos prismas do ensaio de carbonatação acelerada, de dimensões 100x100x400 mm, sendo desmoldados com 24 horas e colocados em processo de cura úmida até as idades de realização dos ensaios. Os índices físicos determinados foram pelos ensaios de absorção de água por capilaridade, de absorção de água por imersão e de índice de vazios. Quanto as propriedades de durabilidade dos concretos, estas foram determinadas pelos ensaios de migração de cloretos no estado não-estacionário e carbonatação acelerada.

3.5.1 Absorção de água por imersão e índice de vazios

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado aos 253 dias de idade do concreto, data adiada por conta da pandemia, de acordo com as definições da NBR 9778 (ABNT, 2005). Inicialmente os corpos de prova foram secos em estufa por 72 horas, à $105 \pm 5^\circ \text{C}$, sendo pesados para obtenção da massa seca (m_s). Em seguida os corpos de prova foram colocados imersos em

água por 72 horas, Figura 3.13 (a). Após o período de 72 horas, colocou-se os corpos de prova em um recipiente com água aquecida até o ponto de ebulição, permanecendo nesse processo por 5 horas, Figura 3.13 (b). O resfriamento dos corpos de prova aconteceu com estes imersos na água, sendo posteriormente retirados e secos superficialmente com um pano para determinação das massas saturadas (m_{sat}). Por fim, com o auxílio de uma balança hidrostática aferiu-se as massas imersas (m_i).

Figura 3.13 - (a) Corpos de prova imersos em água; (b) Corpos de prova em fervura.



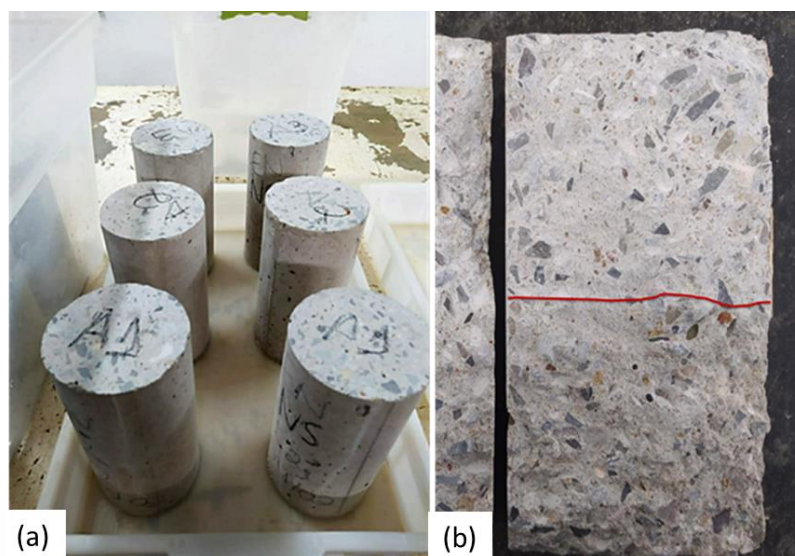
Fonte: Elaboração própria

3.5.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 253 dias, data adiada por conta da pandemia, seguindo as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012). Primeiramente determinou-se a massa dos corpos de prova ao ar, temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Posteriormente, os corpos de prova foram levados à estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, permanecendo em processo de secagem até alcançar constância de massa, aferindo então a massa seca (m_s). Os corpos de prova secos foram dispostos em recipientes planos em contato com uma lâmina de 5 ± 1 mm de água, medindo a altura da lâmina a partir da base do corpo de prova, Figura 3.14 (a). Tiras finas de vidro foram utilizadas como suporte para os corpos de prova, permitindo o contato da água com a base do mesmo. Foram aferidas as massas saturadas às 3, 6, 24, 48 e 72 horas de ensaio. Após a leitura das 72 horas, realizou-se o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, NBR

7222 (ABNT, 2011), permitindo averiguar a distribuição da água no interior do corpo de prova, Figura 3.14 (b).

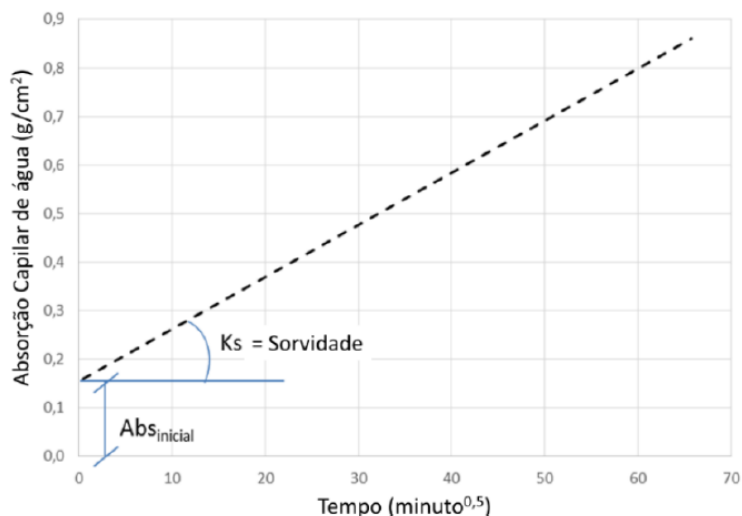
Figura 3.14 - (a) corpos de prova em lâmina d'água; (b) verificação da distribuição de água na amostra rompida.



Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade, determinou-se o coeficiente de sorvidade dos concretos (K_s). A sorvidade é uma propriedade inerente de cada material. Ela está associada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão de poros, portanto, trata-se do fenômeno de transporte de fluidos em materiais porosos. O coeficiente de sorvidade é calculado por meio da linearização do gráfico de absorção capilar *versus* a raiz quadrada do tempo. Para que este gráfico seja linear, é necessário que o eixo das abscissas seja expresso como raiz quadrada do tempo, conforme o procedimento estabelecido pelo comitê técnico TC 116-PCD (RILEM, 1999). Por conseguinte, o coeficiente de sorvidade é o coeficiente angular da reta obtida, enquanto a absorção inicial é o coeficiente linear, como mostra o gráfico apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial.



Fonte: Medeiros *et al.* (2017).

3.5.3 Migração de cloretos no estado não estacionário

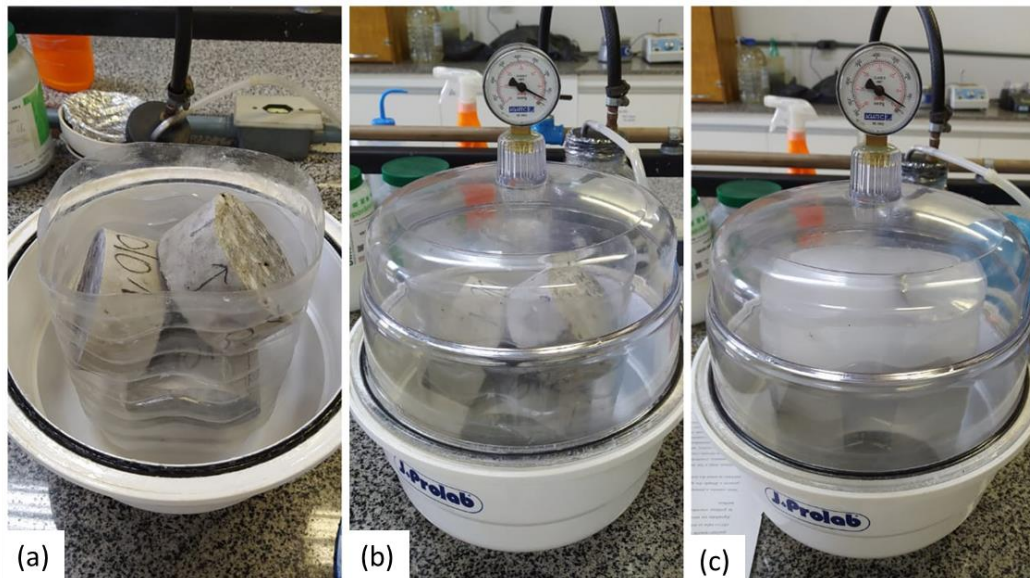
A análise da resistência do concreto frente à ação de íons de cloreto foi realizada pelo ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário, de acordo com as definições da NT BUILD 492 (2011). O ensaio foi realizado aos 253 dias, data adiada por conta da pandemia.

Para a realização deste ensaio foram produzidos corpos de prova de concreto cilíndricos de dimensões 100x200 mm. Esses corpos de prova foram cortados com disco diamantado em quatro partes iguais, formando discos de 50 mm de espessura. Os dois discos centrais foram aproveitados, enquanto as extremidades foram descartadas, prezando pelo concreto com maior homogeneidade. Após o corte, as amostras a serem ensaiadas foram limpas em água corrente, removendo quaisquer materiais soltos aderidos à sua superfície, e posteriormente retirou-se o excesso de água de suas superfícies utilizando um pano seco. Com as amostras limpas se iniciou o processo de pré-condicionamento.

Para o pré-condicionamento as amostras foram colocadas dentro de um recipiente com suas extremidades expostas para aplicação do vácuo, Figura 3.16 (a). O vácuo foi aplicado em um dessecador com manômetro, com o auxílio de uma bomba de vácuo. A pressão absoluta do dessecador foi reduzida à uma pressão na faixa de 10 - 50 mbar, ou 1 - 5 kPa, Figura 3.16 (b). As amostras permaneceram no vácuo por três horas. Em seguida, o recipiente contendo as amostras foi preenchido com solução saturada de Ca(OH)₂, dissolvendo o excesso de hidróxido

de cálcio em água destilada, até imersão total das amostras, Figura 3.16 (c). As amostras foram mantidas na solução com vácuo por uma hora. Posteriormente o vácuo foi retirado e as amostras permaneceram por mais 18 ± 2 horas na solução.

Figura 3.16 - Processo de pré-condicionamento das amostras.



Fonte: Elaboração própria

Após o pré-condicionamento, as amostras foram colocadas em uma luva de PVC de 100 mm, sendo as laterais das superfícies superiores e inferiores vedadas com um selante a base de silicone, não permitindo o vazamento e o contato entre as duas soluções, Figura 3.17. Com as amostras prontas, um pedaço de tubo PVC de 100 mm foi acoplado à luva, para que coubesse toda a solução a ser utilizada.

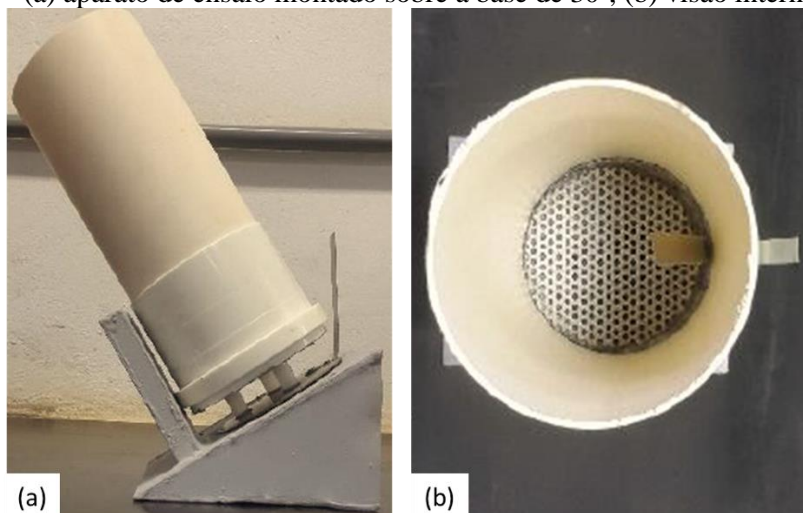
Figura 3.17 - Amostras posicionadas em luvas de PVC com laterais vedadas.



Fonte: Elaboração própria

Após o processo de vedação das amostras, duas placas de aço inox foram posicionadas nas extremidades da amostra para que fosse aplicada a diferença de potencial necessária para executar o ensaio. A placa superior era perfurada permitindo o contato da solução anódica com o concreto, enquanto a placa inferior continha suportes plásticos aderidos, garantindo espaçamento para que a solução catódica entrasse em contato com o concreto. O aparato foi posicionado em seguida sobre um suporte com inclinação de 30° e levado à um recipiente plástico. A Figura 3.18 (a) mostra o aparato montado em inclinação de 30° e (b) o interior do aparato, com a placa superior perfurada.

Figura 3.18 - (a) aparato de ensaio montado sobre a base de 30° ; (b) visão interna do aparato.



Fonte: Elaboração própria

O recipiente plástico escolhido foi um de tamanho suficiente para que fossem posicionadas as quatro amostras relativas à cada traço de cada idade ensaiada. No recipiente contendo as quatro amostras foi colocada a solução catódica de 10% de cloreto de sódio sobre a massa de água, ou seja, 100 g de NaCl para cada 900 g de água. Cada aparato contendo as amostras foi preenchido com solução anódica de hidróxido de sódio em água destilada, contendo aproximadamente 12 g de NaOH para 1 litro de água.

Seguindo à colocação das soluções, foi feita a conexão em paralelo dos aparatos, isto é, os cátodos foram ligados ao polo negativo e os ânodos ao polo positivo da fonte de corrente contínua. A fonte de corrente contínua utilizada era da marca Minipa, modelo Power Supply MPC – 3003D. A fonte foi inicialmente ligada e ajustada na tensão de 30 V, sendo esse valor medido com o auxílio de um multímetro. Posteriormente, foi medida a corrente inicial de cada uma das quatro amostras, e em função das correntes medidas foi ajustado o valor da tensão, conforme os valores apresentados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos.

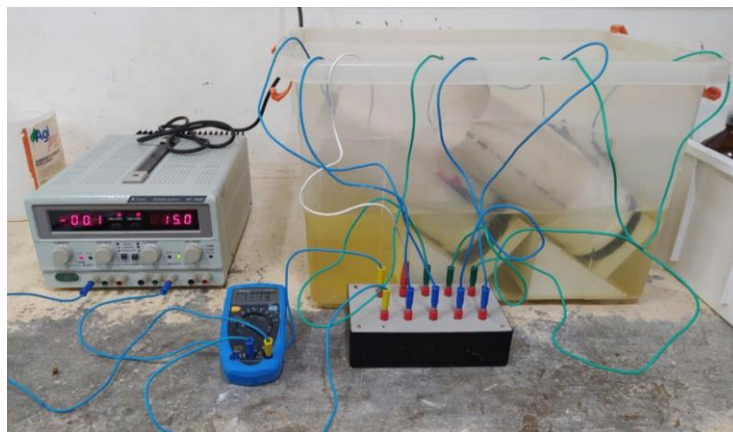
Corrente inicial I30V (Com 30V) (mA)	Tensão aplicada U (após do ajuste) (V)	Provável nova corrente inicial (mA)	Duração do ensaio (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: NT BUILD 492 (2011).

Após o ajuste de tensão, nos casos necessários, anotou-se o valor da nova corrente elétrica (corrente inicial) de cada amostra e a temperatura inicial da solução anódica. Com o valor da corrente inicial foi definida a duração do ensaio, de acordo com a Tabela 3.10. Ao fim do

período do ensaio anotou-se a corrente elétrica final e a temperatura final da solução anódica. O ensaio em andamento pode ser visto na Figura 3.19.

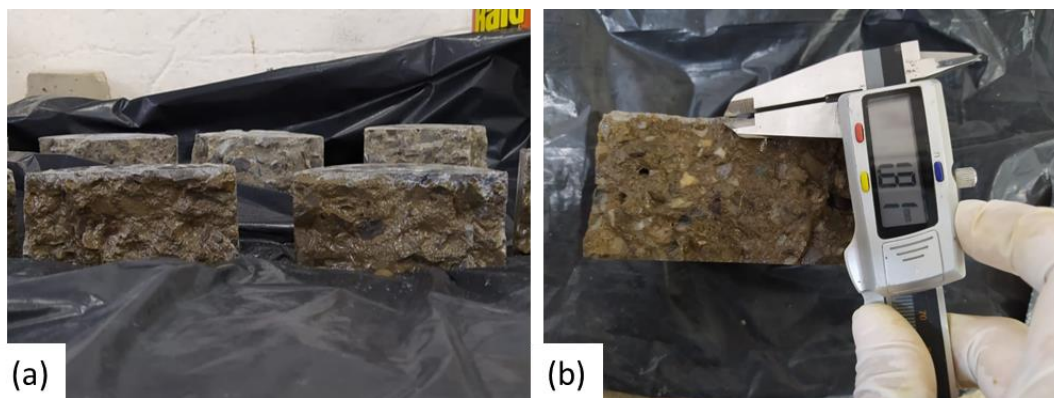
Figura 3.19 - Ensaio de migração de cloretos em andamento.



Fonte: Elaboração própria

Após o término do ensaio, as amostras foram rompidas à tração por compressão diametral. Em seguida, escolheu-se a metade da amostra com a face fraturada mais regular, e sobre essa face foi aspergida uma solução de nitrato de prata (AgNO_3) 0,1 molar, Figura 3.20 (a). O nitrato de prata aspergido na solução reage quimicamente com o cloreto presente no concreto, formando cloreto de prata (AgCl). A partir dessa reação se torna possível medir a frente de penetração de cloretos, pois é gerado um contraste visual na superfície do concreto, onde a porção que contém cloretos fica mais clara, em um tom prateado ou esbranquiçado, Figura 3.20 (b).

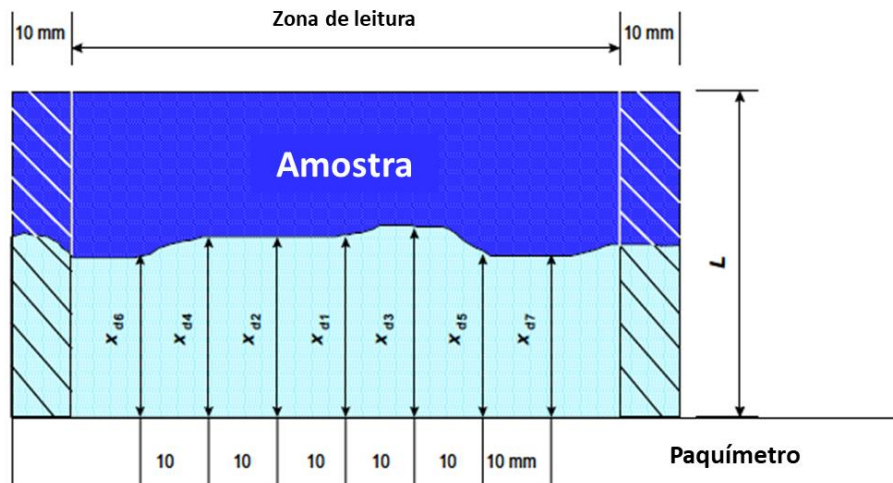
Figura 3.20 - (a) amostras partidas com solução de nitrato de prata; (b) medição da frente de penetração de cloretos.



Fonte: Elaboração própria

A norma determina que devem ser feitas 7 leituras da frente de penetração de cloretos, leituras espaçadas com cerca de 10 mm. Evita-se leituras a menos de 10 mm das bordas, evitando efeitos de borda causados por um grau heterogêneo de saturação ou possíveis vazamentos das soluções na vedação com selante. A Figura 3.21 apresenta o procedimento correto para medição da frente de penetração de cloretos.

Figura 3.21 - Procedimento de medição da frente de penetração de cloretos.



Fonte: Adaptado de NT BUILD 492 (2011).

Com os dados obtidos ao final de todas as leituras, foi possível calcular o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário para cada traço de cada idade. A equação utilizada para o cálculo foi a Equação 3.2.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LXd}{U-2}} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

D_{nssm} , coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário (10^{-12} m²/s);

U, valor da tensão (V);

T, média entre as temperaturas finais e iniciais (°C);

t, duração do ensaio (h);

L, espessura do corpo de prova (mm);

Xd, média da frente de penetração de cloretos (mm).

3.5.4 Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada dos traços de concreto produzidos foi realizado conforme as orientações da ISO 1920-12 (2015). Os corpos de prova produzidos para este ensaio foram prismáticos, com dimensões de 100x100x400 mm, sendo produzidos dois corpos de prova por traço.

Após a moldagem dos corpos de prova, estes seguiram para o processo de cura úmida por 28 dias. Ao final do período de cura, os corpos de prova foram pré-condicionados por 14 dias para que secassem e entrassem em equilíbrio de umidade com o ambiente. Os corpos de prova foram pré-condicionados em ambiente laboratorial seguindo as recomendações normativas, portanto, o ambiente foi mantido em temperatura na faixa de 18 – 29 °C e em umidade na faixa de 50 – 70%. Ao final do pré-condicionamento, a face superior e a face inferior, e as duas faces das extremidades dos prismas foram seladas com parafina, prevenindo o ingresso de CO₂ por essas faces. Somente duas faces longitudinais dos prismas ficaram expostas, direcionando o fluxo de difusão de CO₂.

Os prismas selados foram levados à câmara de carbonatação acelerada, sendo posicionados de forma que o ar circulasse livremente pelas faces expostas. Os parâmetros da câmara de carbonatação foram ajustados para climas quentes, como o caso de Brasília-DF, com concentração de $3 \pm 0,5$ % de CO₂ por volume, temperatura a 27 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5 %. Os prismas ficaram em processo de carbonatação pelo total de 211 dias, sendo ensaiados na idade de 253 dias, data alterada devido às complicações geradas por conta da pandemia. Na Figura 3.22 é apresentado os corpos de prova prismáticos organizados dentro da câmara.

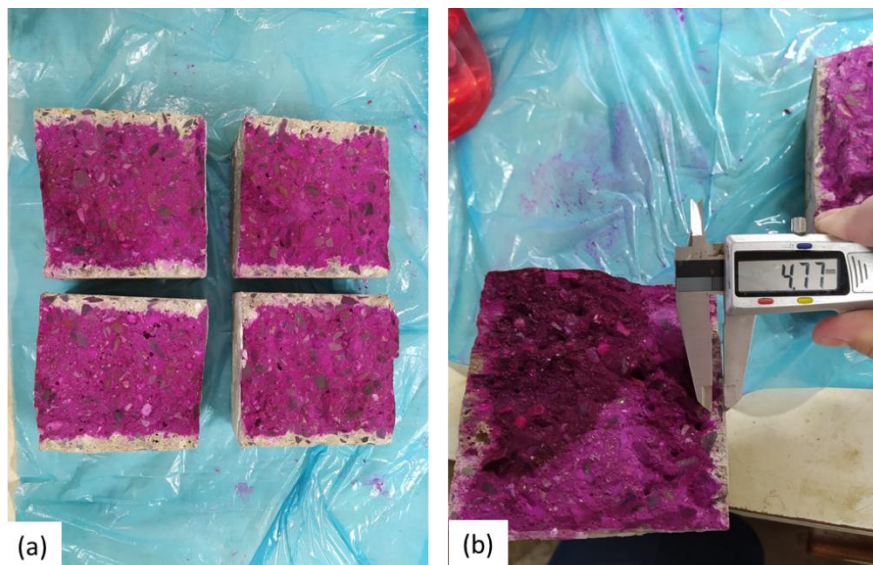
Figura 3.22 - Disposição dos prismas no interior da câmara.



Fonte: Elaboração própria

Para o ensaio de medição da profundidade da frente de carbonatação, os corpos de prova foram retirados da câmara e rompidos a intervalos de cerca de 50 mm, tendo a face exposta selada com parafina. Esse processo não foi repetido em outras idades de ensaio devido as adaptações feitas no decorrer da pandemia, resultando em somente uma idade de ensaio. Na face da fatia retirada do prisma foi aplicada uma solução de fenolftaleína indicadora de pH, permitindo que fossem feitas as leituras de frente de carbonatação. A solução foi composta por 70% de álcool etílico, 29% de água destilada e 1% de fenolftaleína. Utilizou-se um paquímetro com precisão de 0,01 mm para realização das leituras. Como recomendado pela norma, cada lateral foi seccionada em 7 pontos com espaçamentos iguais, sendo utilizados para medição os 5 pontos centrais. Por amostra foram feitas 10 medições, totalizando 20 leituras por traço de concreto produzido. Na Figura 3.23 (a) vê-se o corpo de prova rompido para o ensaio e (b) a face com solução de fenolftaleína aplicada.

Figura 3.23 - (a) Prismas rompidos para medição da frente de carbonatação; (b) Medição da frente de carbonatação.



Fonte: Elaboração própria

Ressalta-se que os parâmetros de concentração de CO_2 , temperatura e teor de umidade da câmara de carbonatação são determinados por um sensor programado com placas de Arduino. O controle de concentração de CO_2 na câmara é automatizado, o ajuste de temperatura quando necessário é feito com o auxílio de uma lâmpada incandescente e a umidade relativa foi controlada com sílica gel.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos nos ensaios do programa experimental passaram por uma análise estatística. Optou-se por utilizar o software Statistica, desenvolvido pela TIBCO.

Foi realizada a análise de variância “One-way ANOVA” com o propósito de avaliar a influência da abordagem de mistura em dois estágios, da substituição do cimento Portland por metacaulim, da substituição do cimento Portland por metacaulim com adição de nanosílica, e do tratamento do ARC por carbonatação acelerada.

A análise de variância (ANOVA) permite identificar se as médias divergem significativamente, isto é, analisa se a variável independente tem efeito sobre a variável dependente. O Valor-P, chamado também de probabilidade de significância, permite avaliar se existe tal influência. As

hipóteses foram testadas para um nível de significância $\alpha = 0,05$, de forma que o nível de confiança foi de 95%.

Para as análises nas quais o Valor-P foi inferior a 0,05, considerou-se que houve efeito significativo da variável independente sobre a variável dependente. No entanto, para os casos em que o Valor-P foi igual ou superior a 0,05, a influência da variável independente sobre a variável dependente foi não significativa.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

O ensaio realizado no estado fresco foi o de massa específica no estado fresco.

4.1.1 Massa específica no estado fresco

Os valores de massa específica dos concretos no estado fresco estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Massa específica dos concretos produzidos no estado fresco.

Massa específica (kg/m³)					
CREF	CARC	CARC-CP	CARC-CPMK	CARC-CPMKNS	CARC-Carb
2360	2336	2331	2353	2282	2378

Fonte: Elaboração própria

Houve uma redução da massa específica dos traços produzidos contendo ARC em relação quando comparados ao CREF, com exceção do CARC-Carb. Esse comportamento era esperado devido à substituição parcial do agregado graúdo britado pelo ARC, pois o ARC possui massa específica menor do que o agregado graúdo britado. Para os traços CARC, CARC-CP, CARC-CPMK e CARC-CPMKNS, os valores de massa específica se mantiveram próximos, no entanto, para o traço CARC-Carb, há um aumento da massa específica em relação aos traços CREF e CARC.

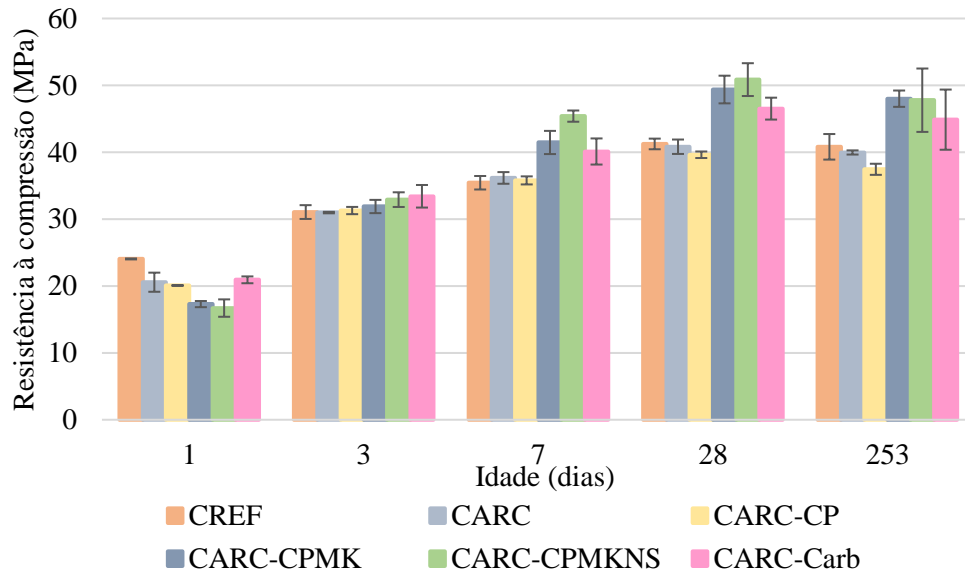
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A avaliação das propriedades mecânicas foi realizada por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo estático de elasticidade à compressão.

4.2.1 Resistência à compressão simples

Os resultados médios de resistência a compressão dos 3 corpos de prova de concreto produzidos para cada idade, sem ARC e com ARC, variando os tratamentos, estão dispostos na Figura 4.1. Os resultados individuais de cada traço estão dispostos na Tabela A.1, no Apêndice.

Figura 4.1 - Resistência à compressão dos concretos com 1, 3, 7, 28 e 253 dias de idade.



Fonte: Elaboração própria

Para 1 dia de idade, todos os concretos com ARC obtiveram resistência à compressão menor em relação ao CREF. Para os concretos CARC, CARC-CP, CARC-CPMK, CARC-CPMKNS e CARC-Carb, que passam processo de pré-molhagem, pelo MMDE ou não, deve-se considerar que a relação a/c ao redor do ARC é maior devido à água de amassamento ficar retida à superfície do ARC, reduzindo a resistência dos traços nesta idade. Esse comportamento era esperado, e cessa por volta do terceiro dia de idade dos concretos. Os traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS são os que atingem a menor resistência nesta idade, isso também é devido à substituição do cimento por MCS. Os MCS, ao formar uma pasta mais densa em relação às pastas sem MCS, dificultam a absorção da pasta de tratamento pelo ARC. Em conjunto, o cimento utilizado atinge altos valores de resistência nas primeiras idades, no entanto, as reações pozolônicas produzidas pelas misturas binárias e ternárias, por conta do metacaulim, irão se manifestar em idades superiores.

Para a idade de 1 dia, o traço CARC apresentou uma redução de 14,5% na resistência à compressão em relação ao CREF. No entanto, a partir dos 3 dias a resistência à compressão dos traços CREF e CARC evoluem para valores próximos entre si. Houve um aumento de 3,1% para a idade de 253 dias. O valor P obtido foi de 0,491, mostrando diferença não significativa aos 253 dias. Mesmo com 20% de substituição de agregado graúdo britado por ARC, os valores do CARC se mantiveram próximos do CREF, isso deve-se ao fato de ter-se mantido a

distribuição granulométrica do agregado graúdo e que o ARC utilizado possui boa qualidade, contendo pouca argamassa aderida em sua superfície. O processo de moagem para a obtenção do ARC funciona como um método de tratamento, pois a partir da moagem do material é feita a remoção de parte da argamassa aderida na superfície dos agregados graúdos originais. Silva e Capuzzo (2020) observaram o mesmo comportamento em seu trabalho, no qual a moagem do ARC serviu como um tratamento prévio.

Os valores de resistência obtidos para o traço CARC-CP foram bem próximos aos valores obtidos para o traço CARC. Aos 253 dias houve redução de 8,1% na resistência à compressão, e valor P de 0,007, evidenciando que a redução na resistência à compressão simples no concreto produzido foi significativa. Nos trabalhos de Tam *et al.* (2005), Zhihui *et al.* (2013) e Silva e Capuzzo (2020) foi observada uma melhora na resistência à compressão dos concretos com ARC tratado pelo MMDE para traços em que a relação a/c da pasta era menor. Esses resultados não foram observados nesta pesquisa, podendo ser justificado por dois fatores. Primeiro, pela qualidade do ARC utilizado, este possuindo pouca argamassa aderida proporcionando um bom resultado para o traço de referência sem tratamento, CARC. Segundo, pela variabilidade inerente do ARC, que pode causar grandes mudanças para parâmetros semelhantes.

Com 1 dia, o traço CARC-CPMK apresentou resistência à compressão inferior em 15,9% ao traço de referência contendo ARC, o CARC, sendo tal resultado justificado pela utilização de metacaulim na mistura. O metacaulim costuma ter um tempo de reação um pouco maior em relação ao cimento Portland, dependendo de suas características, demorando um pouco mais para apresentar ganho de resistência em relação ao cimento Portland. Além disso, os MCS, devido à sua finura, e a formarem uma pasta de tratamento mais densa, dificultam a absorção da pasta de tratamento pelo ARC. O traço CARC-CPMK aos 3 dias apresentou um ganho de resistência de 2,9% em relação ao traço de referência CARC. Esse ganho está associado ao efeito filer gerado pelo metacaulim, além do início do processo de reação dele em conjunto com o cimento Portland. Aos 7 dias o traço CARC-CPMK apresentou ganho de resistência de 14,7% em relação ao CARC. Aos 28 dias, o aumento da resistência mecânica foi de 21% para o traço CARC-CPMK em relação ao CARC. Aos 253 dias, o aumento da resistência mecânica foi de 17,6% em relação ao CARC, apresentando valor P de 0,0003, mostrando que o tratamento deste traço foi significativo. A partir do sétimo dia, o ganho de resistência se dá pelas reações pozolânicas que vão ocorrendo na mistura, gerando C-S-H e C-A-S-H na pasta. Esse

comportamento de ganho de resistência no traço contendo ARC e MK são compatíveis com os resultados obtidos nas pesquisas de Kou *et al.* (2011) e Radonjanin *et al.* (2013).

Seguindo o padrão dos resultados do traço contendo somente metacaulim, CARC-CPMK, o traço contendo nanosílica apresentou baixa resistência na primeira idade de ensaio, tendo redução de 18,8% na resistência à compressão em comparação com o traço CARC. Apesar do traço conter nanosílica, material altamente reativo, a grande presença de metacaulim fez com que o ganho de resistência inicial fosse mais lento, além do mais, a quantidade de nanosílica foi baixa, sendo uma adição de 1% da massa do cimento. Aos 3 dias, o traço CARC-CPMKNS teve um ganho de resistência de 6,2% em relação ao CARC. Esse ganho de resistência mecânica está associado tanto ao efeito fíler, quanto à reatividade de ambos MCS. Com 7 dias de idade, o ganho de resistência à compressão do traço CARC-CPMKNS foi de 21,2% em relação ao traço CARC. Aos 28 dias, o aumento da resistência à compressão foi de 24,6% para o traço CARC-CPMKNS em relação ao CARC. Aos 253 dias para o traço CARC-CPMKNS o aumento da resistência mecânica foi de 17% em relação ao CARC, apresentando valor P de 0,046, tornando o tratamento realizado com MK e NS efetivo. Assim como o traço contendo somente metacaulim, o ganho de resistência à compressão à partir do sétimo dia se dá pelo desenvolvimento das reações pozolânicas tanto do metacaulim, quanto da nanosílica, aumentando os teores de C-S-H e C-A-S-H na pasta. Em adição às reações pozolânicas, devido à presença dos dois MCS, ocorre o efeito sinérgico entre eles, potencializando o ganho de resistência à compressão.

Para o traço CARC-Carb, os valores de resistência à compressão se mostraram superiores aos valores do traço CARC. Com 1 dia houve um aumento de 1,8% em relação ao CARC. Aos 3 dias, o traço CARC-Carb teve um aumento na resistência mecânica de 7,9% em relação ao traço CARC. Aos 7 dias houve um aumento de 10,9% na resistência mecânica do CARC-Carb em relação ao CARC. Para 28 dias de idade, o aumento da resistência do CARC-Carb em relação ao CARC foi de 14%. Aos 253 dias o aumento da resistência do CARC-Carb em relação ao CARC foi de 12,3%, e valor P de 0,034, mostrando melhora significativa no traço com ARC carbonatado. O aumento do desempenho mecânico do CARC-Carb sugere que a carbonatação acelerada do ARC é efetiva, formando CaCO_3 nos poros da argamassa do ARC. Esse processo leva à redução e refinamento da porosidade superficial da argamassa aderida ao ARC, melhorando a qualidade deste e do concreto produzido com ele. A redução da porosidade do ARC pela colmatação da argamassa antiga por conta do processo de carbonatação faz com que

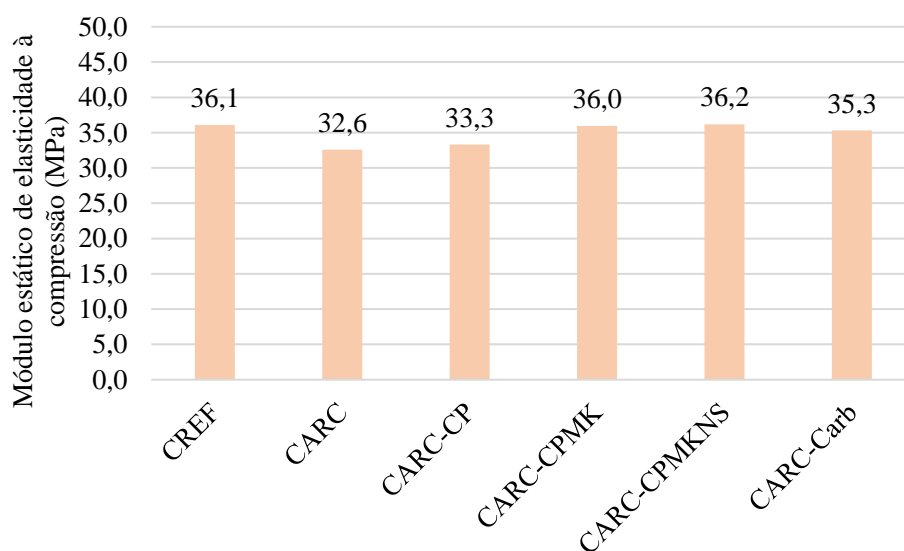
ocorra uma desaceleração no processo de absorção de água, aumentando a relação a/c no concreto. Isto em conjunto com a maior dispersão do traço CARC-Carb devido a maior quantidade de aditivo superplastificante, evidencia com 1 dia de idade o menor aumento de resistência em relação ao CARC. Contudo, devido às melhoras nas características do ARC, ainda houve um pequeno incremento na resistência à compressão do CARC-Carb em relação ao CARC. Alguns pesquisadores comprovaram em suas pesquisas o padrão de melhora da resistência à compressão nos concretos produzidos com ARC carbonatado, como Xuan *et al.* (2016), Liang *et al.* (2019), e Lu *et al.* (2019)

Salienta-se que a substituição dos agregados por faixa granulométrica, conservando a granulometria original, favoreceu o fator de empacotamento dos grãos. Ao manter o fator de empacotamento dos grãos, uma variável da análise é eliminada. Isso pode ser observado nos traços contendo ARC, estes mantiveram seus valores de resistência mecânica próximos ou superiores ao traço CREF. Além do mais, ressalta-se que a moagem do ARC para manter a distribuição granulométrica funciona como um pré-tratamento.

4.2.2 Módulo estático de elasticidade à compressão

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado aos 28 dias de idade de cada traço. Os resultados obtidos através deste ensaio estão apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Módulo estático de elasticidade à compressão dos concretos produzidos.



Fonte: Elaboração própria

Observou-se uma redução de 9,6 % no módulo de elasticidade do traço CARC em relação ao traço CREF, como era esperado devido às propriedades do ARC serem inferiores quando comparadas ao agregado graúdo britado de origem natural. O valor P obtido foi de 0,024, ou seja, a redução do valor de módulo de elasticidade foi significativa.

O traço CARC-CP apresentou uma melhora no módulo de elasticidade de 2,3% em relação ao CARC, obtendo valor P de 0,5, mostrando que essa diferença não foi significativa pela análise estatística e ambos traços obtiveram resultados estatisticamente semelhantes.

Houve um aumento de 10,3% no módulo de elasticidade obtido no traço CARC-CPMK em relação ao traço de referência CARC, com Valor-P de 0,017, sendo esse aumento significativo. Tal melhora segue o padrão de melhora obtido na resistência à compressão, como esperado.

Assim como o traço CARC-CPMK, o traço CARC-CPMKNS apresentou um aumento no módulo de elasticidade em relação ao traço de referência CARC. O aumento foi de 11,1% e o Valor-P de 0,017 foi significativo, seguindo o padrão de melhora da resistência a compressão deste traço. Tal comportamento de aumento no módulo de elasticidade com a utilização de metacaulim foi observado na pesquisa de Radonjanin *et al.* (2013).

O traço CARC-Carb obteve no ensaio de módulo de elasticidade um aumento de 8,3% no valor obtido quando comparado ao traço referência CARC, e Valor P de 0,055, sendo este não significativo. Tal resultado é compatível com os resultados obtidos por Xuan *et al.* (2016).

Os valores obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade, de forma geral, foram bons, quando comparados com o traço de referência, ainda que tenha sido utilizado ARC na produção dos concretos.

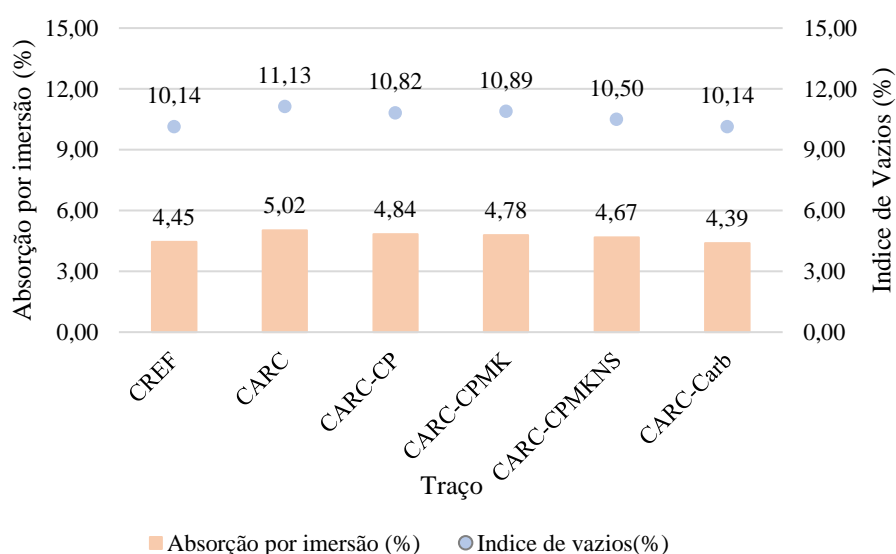
4.3 ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

Conhecer os parâmetros de durabilidade do concreto é de suma importância para o planejamento de sua utilização e projeção da vida útil das estruturas. A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para determinação dos índices físicos e avaliação da durabilidade dos concretos. Os ensaios realizados foram de absorção de água por imersão e índice de vazios, absorção de água por capilaridade, migração de cloretos no estado não-estacionário e de carbonatação acelerada.

4.3.1 Absorção por imersão e índice de vazios

O resultado da absorção de água por imersão de um concreto dependerá diretamente dos poros do concreto, e da conexão entre estes. Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão, realizado aos 253 dias de idade, bem como do índice de vazios do concreto, obtido pelo mesmo ensaio, estão apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos aos 253 dias.



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que ao substituir parcialmente o agregado natural pelo ARC, ambos valores de absorção por imersão e de índice de vazios do traço CARC tiveram um aumento em relação ao traço CREF de 13% e de 10%, respectivamente. Os valores P obtidos foram de 0,002 para absorção por imersão e índice de vazios, demonstrando que o aumento observado para esses parâmetros foi significativo. Esse aumento foi devido a maior porosidade do ARC em relação ao agregado natural, o que acaba influenciando na porosidade total aberta do concreto produzido.

Para o traço CARC-CP, houve uma melhora dos resultados em relação ao traço CARC, com redução de 3% tanto para a absorção por imersão quanto para o índice de vazios, e valor P de 0,11 para ambos ensaios. Apesar da redução dos valores obtidos para ambos parâmetros, estes não foram significativos.

O traço CARC-CPMK apresentou uma redução nos valores obtidos em relação ao CARC, em 5% na absorção por imersão e em 2% e no índice de vazios. Os valores P obtidos foram de 0,25 e 0,55 para os ensaios de absorção por imersão e índice de vazios, respectivamente. Apesar da melhora atribuída à utilização do metacaulim como MCS, que leva ao refinamento da estrutura porosa do material cimentício, a diferença observada não foi significativa.

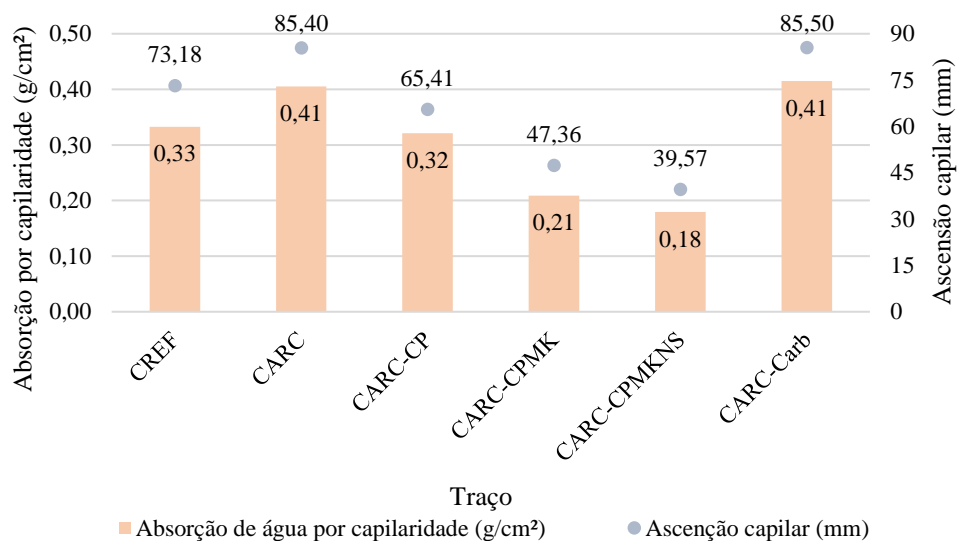
Para o traço CARC-CPMKNS houve redução de 7% na absorção por imersão e de 6% no índice de vazios em relação ao traço CARC. Os valores P obtidos foram de 0,03 e 0,04 para os ensaios de absorção por imersão e índice de vazios, respectivamente, mostrando que com a utilização na NS a diferença de resultados para esses parâmetros foi significativa. Esta melhora nos resultados obtidos neste ensaio foi esperada devido a melhoria também obtida nas propriedades mecânicas destes traços, pois o mesmo mecanismo que melhorou o desempenho mecânico dos traços também age refinando a estrutura porosa do material cimentício, dificultando o transporte de fluidos no meio.

O tratamento com carbonatação acelerada dos ARC levou ao traço CARC-Carb alcançar valores inferiores em 12% de absorção de água e em 9% de índice de vazios em relação ao CARC. Os Valores P obtidos foram de 0,0027 e 0,0055 para absorção de água e índice de vazios, respectivamente, sendo ambos valores obtidos significativos. Xuan *et al.* (2017) obtiveram em sua pesquisa redução nos valores de absorção por imersão dos concretos produzidos com ARC carbonatado em contraste ao traço referência. A carbonatação do ARC ocasiona uma melhora no agregado por meio do refinamento e da colmatação dos poros mais próximos à superfície com a produção de CaCO_3 na argamassa aderida ao antigo agregado.

4.3.2 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado aos 253 dias de idade dos concretos produzidos. Os resultados da absorção por capilaridade, bem como da ascensão capilar, estão dispostos na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Absorção de água por capilaridade e ascensão capilar dos concretos produzidos aos 253 dias.



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que o traço CARC obteve um aumento de 21% na absorção de água por capilaridade e de 16% na ascensão capilar em relação ao CREF, como era esperado devido a maior absorção do ARC utilizado em relação ao agregado natural. Apesar dessa diferença, pela análise estatística o valor P obtido foi de 0,4, mostrando que a diferença não foi significativa para absorção de água por capilaridade.

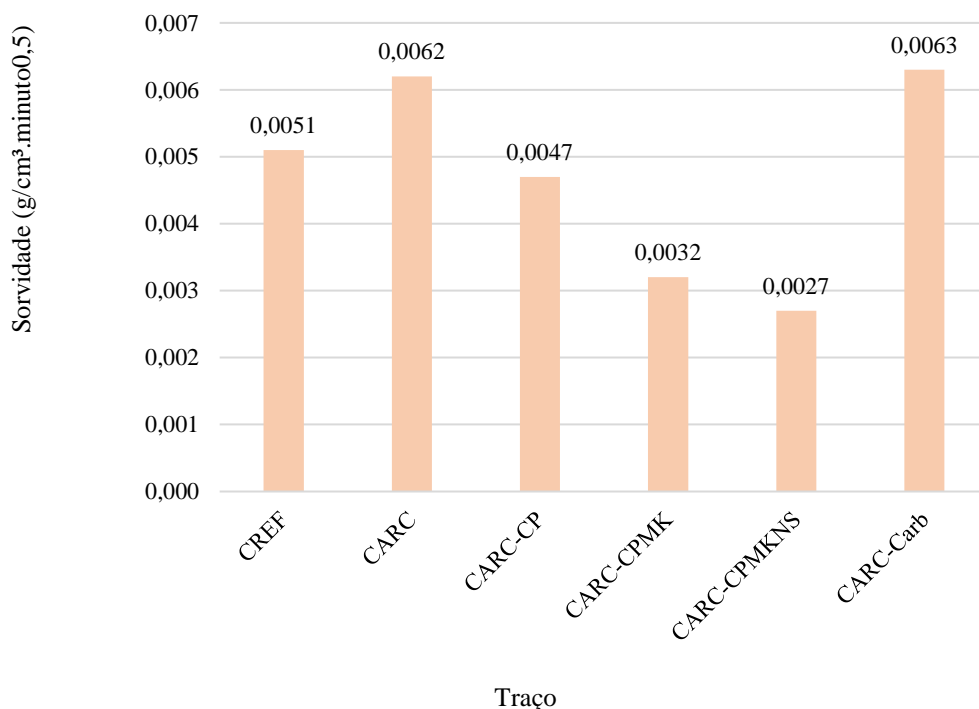
Para o traço CARC-CP houve redução de 20% para ambos parâmetros, absorção por capilaridade e ascensão capilar, em relação ao traço CARC. O valor P obtido pela análise estatística quanto ao ensaio de absorção foi de 0,08, sendo essa redução não significativa.

Nos traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS houve uma redução de 48% e 55% da absorção e 44% e 53% da ascensão capilar, respectivamente, em relação ao CARC. Essa redução alcançada foi significativa, com valores P de 0,0009 e 0,0004 para os traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS, respectivamente. Tal redução ocorreu devido ao refinamento e tamponamento dos poros do ARC e da argamassa do concreto pela utilização do MMDE em conjunto com o cimento Portland, MK e NS. Assim como na absorção por imersão, essa melhora no desempenho para o ensaio de absorção por capilaridade era esperada ao observar a melhora do desempenho dos traços nas propriedades mecânicas.

O traço CARC-Carb apresentou resultados bem próximos ao CARC, com um aumento de 2,3% na absorção e 0,12% da ascensão capilar, considerando os resultados com todas as casas decimais. O Valor P obtido para a absorção por capilaridade foi de 0,84, não realçando qualquer efeito de melhora significativa do traço para este ensaio em específico. Este comportamento não era esperado, pois esperava-se que com a carbonatação do ARC e com a consequente colmatação superficial da argamassa antiga aderida, ocorresse uma redução na absorção de água por capilaridade. O ideal seria que fosse feita a repetição dos ensaios para averiguar se houve algum erro durante as execuções dos traços ou dos ensaios.

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, foi possível determinar o coeficiente de sorvidade (K_s) dos concretos, Figura 4.5. A sorvidade é uma propriedade inerente de cada material, estando associada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão de poros.

Figura 4.5 - Sorvidade dos traços.



Fonte: Elaboração própria

Os resultados obtidos seguem o padrão apresentado da absorção por capilaridade. O traço CARC apresentou um aumento no coeficiente de sorvidade de 21,6% em relação ao CREF. O

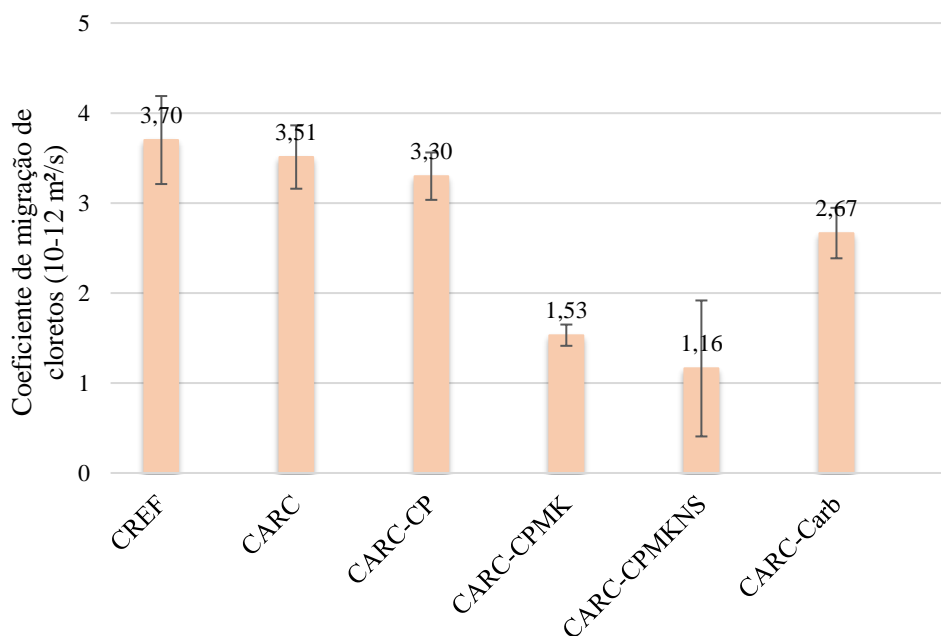
traço CARC-CP alcançou uma redução de 24,2% na sorvidade em relação ao CARC. Os traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS obtiveram uma redução de 48,4% e de 56,5%, respectivamente, nos coeficientes de sorvidade. Para o traço CARC-Carb, observou-se um aumento de 1,6% no coeficiente de sorvidade em relação ao traço de referência CARC, valor não condizente com o esperado, assim como e resultado de absorção por capilaridade, reforçando a necessidade de repetição dos ensaios.

Assim como na absorção por imersão, essa melhora no desempenho para o ensaio de absorção por capilaridade era esperada ao observar a melhora do desempenho dos traços nas propriedades mecânicas.

4.3.3 Migração de cloretos no estado não-estacionário

O coeficiente de migração de cloretos é dado importante para o entendimento do funcionamento do transporte de cloretos no concreto. Ressalta-se que quanto maior o coeficiente de migração de cloretos de um concreto, menor é a resistência desse concreto à migração de cloretos. Os valores obtidos neste ensaio estão dispostos na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Coeficiente de migração de cloretos dos traços aos 253 dias de idade



Fonte: Elaboração própria

O valor do coeficiente de migração de cloretos do traço CARC se manteve próximo do CREF, ocorrendo uma redução de 5,1% do valor do CARC. Pela análise estatística, essa diferença entre os valores não foi significativa, com Valor-P de 0,55. A proximidade nos valores obtidos foi causada pela qualidade do ARC utilizado, o qual possui pouca argamassa aderida superficialmente. Outro fator que favoreceu esse resultado foi realizar a substituição do ARC por faixa granulométrica em relação ao agregado graúdo britado. Essa forma de substituição mantém o mesmo fator de empacotamento das partículas do traço CREF, diminuindo os vazios do concreto. Resultados de resistência à penetração de cloretos obtidos por outros pesquisadores para concretos com ARC, também foram próximos ou superiores aos concretos referência, sem ARC (OTSUKI *et al.*, 2003; MATIAS *et al.* 2014). Tais resultados levam em consideração fatores como as características do concreto que originou o ARC, a relação a/c e utilização de superplastificantes no novo concreto produzido.

O coeficiente de migração de cloretos obtido para o traço CARC-CP se manteve próximo ao resultado obtido para o traço CARC, com redução de 6,1% no valor obtido. O Valor-P foi de 0,37, mostrando que a diferença entre esses traços não foi significativa. Esse resultado mostra que o tratamento realizado no traço CARC-CP não gerou melhoria notável nas características de resistência a migração de cloretos deste concreto aos 253 dias.

O resultado do coeficiente de migração de cloretos para o traço contendo mistura binária de cimento e metacaulim, CARC-CPMK, teve redução de 56,4% ao se comparar com o resultado do CARC, e Valor-P de 0,00004. Para o traço contendo a mistura ternária de cimento, metacaulim e nanosílica, CARC-CPMKNS, a resistência à migração de cloreto obteve o melhor resultado, no qual a redução do coeficiente de migração de cloretos do CARC-CPMKNS em relação ao CARC foi de 67%, obtendo Valor-P de 0,0013. Em relação ao traço CARC-CPMK, o traço CARC-CPMKNS teve uma redução de 24% no coeficiente de migração de cloretos. Os resultados positivos e significativos com a utilização de metacaulim na mistura são compatíveis com outros estudos (KOU *et al.*, 2011; KAPOOR *et al.*, 2016; MUDULI e MUKHARJEE, 2020). Ressalta-se que a redução do coeficiente de migração de cloretos para misturas binárias e ternárias contendo MCS, ocorre devido ao maior refinamento da estrutura porosa e à maior formação de C-S-H na pasta. Esses processos dificultam o transporte de fluidos pelo meio, além de ocorrer adsorção química dos íons de cloreto no C-S-H (VÁSQUEZ *et al.*, 2014).

Para o traço CARC-Carb, houve uma melhora significativa na resistência à migração de cloreto. O coeficiente de migração de cloreto foi 24% menor em relação ao traço CARC e o Valor-P

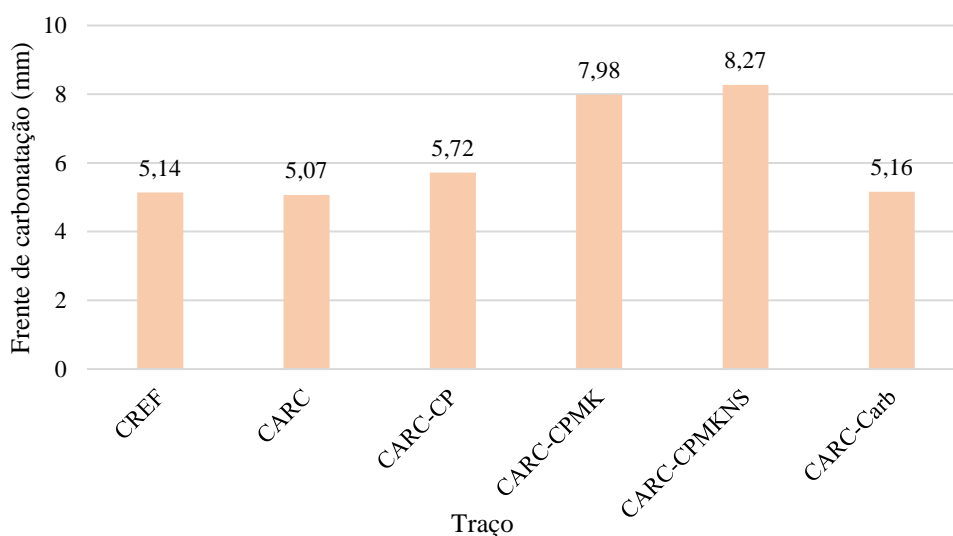
obtido foi de 0,009, sendo este significativo. Os resultados condizem com estudos previamente realizado (XUAN *et al.*, 2017; LIANG *et al.*, 2019). A carbonatação do ARC é eficaz na redução da migração de cloretos no concreto por melhorar as características do ARC. Como citado previamente, a carbonatação forma CaCO_3 na argamassa aderida ao agregado original, formando uma barreira em forma de faixa carbonatada na argamassa, melhorando o desempenho do ARC, assim como dificultando o transporte de fluidos pelo meio.

De maneira geral, para o ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário, os valores obtidos para os concretos contendo ARC foram bons, evidenciando que mesmo utilizando ARC, os concretos atendem a bons resultados, além de que a escolha do MMDE com MK e NS reforçou que a influência dos MCS na produção de novos concretos pode ser positiva.

4.3.4 Carbonatação acelerada

Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados em prismas de dimensões 100x100x400 mm. Os prismas foram ensaiados com 253 dias de idade, após 211 dias em processo de carbonatação acelerada. Ressalta-se que esse período de 211 dias não é o indicado pela ISO 1920-12 (2015), no entanto, foi a data possível para realização do ensaio devido a pandemia de COVID-19. Os resultados da medição da frente de carbonatação estão na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Frente de carbonatação dos concretos.



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que para o traço CARC houve redução de 1,4% na frente de carbonatação acelerada em relação ao traço CREF, sendo essa redução não significativa com valor P de 0,93. Pode-se assumir esse comportamento devido à baixa quantidade de ARC utilizada e à qualidade do ARC. Outros estudos que utilizaram ARC para produção de concreto, verificaram que a frente de carbonatação aumentou de acordo com o aumento da quantidade de ARC no concreto, devido a maior porosidade da argamassa aderida ao agregado reciclado e por zonas de transição danificadas (KOU e POON, 2012; BRAVO *et al.*, 2015; ALEXANDRIDOU *et al.*, 2018; SILVA e CAPUZZO, 2020).

Houve um aumento de 12,7% na frente de carbonatação do traço CARC-CP em comparação com o traço CARC. O traço CARC-CP não apresentou diferença significativa na frente de carbonatação em relação ao CARC, Valor-P de 0,25, mostrando que para esse parâmetro de durabilidade o tratamento se tornou indiferente.

Quanto aos traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS, houve um aumento de 57,2% e de 63,1% na frente de carbonatação em relação ao CARC. Os Valores-P obtidos em comparação com o traço CARC foram de 0,01 para ambos os traços, CARC-CPMK e CARC-CPMKNS, sendo estes aumentos significativos. O que ambos traços têm em comum e que justifica o aumento da carbonatação nesses traços é a utilização de materiais cimentícios suplementares, principalmente o metacaulim. A utilização de materiais cimentícios suplementares em substituição parcial ao cimento Portland leva a reações pozolânicas e a redução da quantidade de cimento na pasta. O metacaulim, por ser altamente reativo, leva a uma redução da reserva alcalina da pasta ao consumir o CH nas reações pozolânicas formando uma grande quantidade de C-S-H. Com a redução do pH do concreto, contribui-se com o processo de carbonatação. Desta forma, a redução da reserva alcalina se torna um fator de influência na velocidade de carbonatação, potencializando esta, sendo um fator mais decisivo do que a sorvidade para estes resultados (RAISDORFER, 2015; MEDEIROS *et.al*, 2017; CÂMARA, 2020; PEREIRA, 2021).

O traço CARC-Carb apresentou um aumento de 1,8% na medição da frente de carbonatação acelerada quando comparado ao traço CARC. Esta diferença não foi significativa, Valor-P igual a 0,86.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O traço de referência contendo ARC sem tratamento, CARC, apresentou valores próximos ao traço de referência sem ARC, CREF, para os ensaios de resistência a compressão, de absorção por capilaridade, de migração de cloretos no estado não estacionário e de carbonatação acelerada. Tais resultados são atribuídos à qualidade do ARC utilizado. Quanto aos ensaios de módulo de elasticidade e absorção por imersão, apresentaram uma pequena diminuição dos índices obtidos em relação ao CREF. Tal redução é explicada pela argamassa presente no concreto antigo, aderida sobre o agregado original. Mesmo que o ARC seja de boa qualidade, a presença de argamassa mesmo que em quantidade mínima, influencia negativamente o desempenho do concreto produzido, por conta de sua alta porosidade e por conta da formação da dupla ZTI.

Os resultados obtidos para o traço produzido pelo MMDE em conjunto com o tratamento com cimento Portland, CARC-CP, se mantiveram próximos aos resultados obtidos para o traço CARC, o qual não recebeu tratamentos. A melhora significativa observada para esse traço se deu somente no ensaio de resistência à compressão.

Para os traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS houve aumento do desempenho na resistência à compressão, no módulo de elasticidade, na absorção por capilaridade, na absorção por imersão e na resistência a migração de cloretos de maneira significativa em relação ao CARC. Esses resultados mostram a efetividade da utilização de MK e NS em misturas binárias e ternárias para tratamento do ARC nesses ensaios. No entanto, no ensaio de carbonatação acelerada, a frente de carbonatação dos traços CARC-CPMK e CARC-CPMKNS foi superior ao traço CARC, devido à substituição do cimento por MK em massa, às reações pozolânicas e à redução da reserva alcalina do concreto.

Pela análise estatística, foi possível ver que a diferença entre o traço CARC-CPMKNS em relação ao CARC-CPMK é mínima, tornando o uso da nanosílica opcional, pois bons resultados podem ser alcançados sem a mesma, somente com o metacaulim.

O traço CARC-Carb apresentou melhora significativa na resistência à compressão, na absorção por imersão e no índice de vazios, e na resistência a migração de cloretos em relação ao CARC. Isto era esperado devido ao processo de carbonatação acelerada do ARC, o qual melhora as características do material através da colmatação dos poros mais próximos à superfície da

argamassa aderida. Para os ensaios de módulo de elasticidade, absorção por capilaridade e de carbonatação acelerada, as diferenças em relação ao traço CARC não foram significativas.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da presente pesquisa desenvolvida. Esta pesquisa estudou o comportamento de novos concretos produzidos com Agregado Reciclado de Concreto (ARC) tratados com diferentes sistemas de tratamento superficial.

Para todos os traços, com exceção do traço de referência CREF, foi utilizado o teor de 20% de ARC na produção dos concretos, em substituição ao agregado graúdo convencional, respeitando a granulometria deste. Visando contornar as características negativas que o ARC gera para o concreto devido à argamassa antiga aderida em sua superfície, foram aplicados os métodos de tratamento nos ARC pelo MMDE com cimento Portland, cimento Portland com metacaulim, cimento Portland com metacaulim e adição de nanosílica, e pela carbonatação acelerada dos ARC.

No estado fresco, notou-se que todos os concretos contendo ARC ficaram mais coesos, necessitando de adição de aditivos superplastificantes para manter sua consistência e abatimento pré-definidos.

Quanto a massa específica no estado fresco, os traços apresentaram uma redução na massa específica, pois a massa específica do ARC é menor em comparação aos agregados convencionais. A única exceção foi para o traço contendo ARC carbonatado, pois o processo de carbonatação modifica a estrutura da argamassa do ARC, refinando e densificando esta, mesmo que não completamente.

Para as propriedades mecânicas, observou-se uma melhora significativa para os todos os traços produzidos pelo MMDE, com cimento Portland, metacaulim e nanosílica, e para o traço contendo ARC carbonatado, mostrando a eficiência dos tratamentos realizados para esses parâmetros nos concretos com ARC.

Quanto aos índices físicos e propriedades de durabilidade, observou-se melhoras de forma geral para os traços produzidos pelo MMDE contendo metacaulim e metacaulim com nanosílica, e para o traço com ARC carbonatado. Em exceção, ressalta-se que para o ensaio de carbonatação acelerada dos dois traços que continham metacaulim, houve uma piora significativa nos resultados obtidos.

O traço produzido que obteve maior destaque foi o traço tratado pelo MMDE com cimento e metacaulim, CARC-CPMK, que obteve de forma geral excelentes resultados, sem o custo adicional da utilização de nanosílica, e com a praticidade do processo de produção, não precisando de um tempo maior para iniciar sua produção, como o traço contendo ARC carbonatado.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar o comportamento dos concretos produzidos variando o teor de ARC da mistura;
- Avaliar como outras proporções de CP e MK na Composição CPMK influenciam nas propriedades dos concretos produzidos com ARC pelo MMDE;
- Avaliar a adição de outros teores de NS no concreto com ARC, com e sem a utilização de MK;
- Utilizar diferentes MCS em conjunto com o MMDE, verificando a efetividade dos tratamentos feitos em conjunto;
- Realizar outros ensaios para avaliar os parâmetros de durabilidade, como o ensaio de resistividade elétrica, determinar o teor de cloretos nos concretos submetidos ao ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário, além de avaliar o efeito combinado dos ensaios;
- Avaliar a estrutura dos concretos contendo ARC tratados no âmbito microestrutural, de maneira a avaliar como os tratamentos afetam a argamassa aderida ao ARC, e principalmente a ZTI antiga.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRIDOU, C., ANGELOPOULOS, G. N., COUTELIERIS, F. A. **Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants.** Journal of Cleaner Production, v. 176. 2018.

ALQARNI, A.; ABBAS, H.; AL-SHWIKH, K.; AL-SALLOUM, Y. **Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance.** Construction and Building Materials, 307, 2021.

ANDRADE, D. S.; REGO, J. H. S.; MORAIS, C.; ROJAS, M. F. **Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosílica.** Construction and Building Materials, v.159. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65 Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

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

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, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:2005 - 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 NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2008.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14656: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

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 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2021.

BAI, G.; ZHU, C.; LIU, C.; LIU, B. **An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties.** Construction and Building Materials, v. 240. 2020.

BAO, J.; LI, S.; ZHANG, P.; DING, X.; XUE, S.; CUI, Y.; ZHAO, T. **Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete.** Construction and Building Materials, v. 239. 2020.

BASF. We create chemistry. **Glenium® 51, Aditivo super plastificante de terceira geração,** 2019.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307,** de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União nº 136, de 17 de julho de 2002. p. 95-96.

BRAVO, M.; BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. **Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants.** Construction and Building Materials, v. 77. 2015.

CÂMARA, M. Y. DE. F. **Estudo da durabilidade de concretos com utilização do cimento LC³.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

CEIA, F.; RAPOSO, J.; GUERRA, M.; JÚLIO, E.; BRITO, J. **Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces.** Construction and Building Materials, 2016.

CHAND, G; KUMAR, A.; RAM, S. **Comparative study of metakaolin, pumice powder and silica fume in producing treated sustainable recycled coarse aggregate concrete by adopting two-stage mixing.** Cleaner Engineering and Technology, 2022.

CHEN, X.; JIAO, C. **Microstructure and physical properties of concrete containing recycled aggregates pre-treated by a nano-silica soaking method.** Journal of Building Engineering, 51, 2022.

COSTA, V. C. M. **Influência da Corrosão Generalizada na Aderência e Comportamento Estrutural de Elementos de Concreto Armado.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

DE JUAN, M.S.; GUTIÉRREZ, P.A. **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v. 23. 2009.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. **Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 158. 2018.

EVANGELISTA L.; DE BRITO, J. **Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates.** Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 9–14, 2010.

ETXEBERRIA, M.; VAZQUEZ, E.; MARI, A. **Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete.** Magazine of Concrete Research. v.58. 2006.

ETXEBERRIA, M. VAZQUEZ, E.; MARI, A.; BARRA, M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.** Cement and Concrete Research, v. 37. 2007.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da Carbonatação em Estruturas de Concreto Armado em Brasília – Avaliação de Pilares.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

FILHO, T. B. DA C. **Avaliação do Desempenho de Argamassas com Adições de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e Cristalina em Relação à Corrosão de Armaduras em Ambientes Contaminados com Íons Cloretos.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste.** Cement and Concrete Composites, v. 33. 2011.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto - Um Novo Material para Dosagens Estruturais.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, 2000.

GOMES, M.; BRITO, J. **Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance.** Materials and Structures, 42:663–75, 2009.

GUEDES, M.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J.; FERRO, A. **Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates,** Microsc. Microanal. v.19. 2013.

GUO, M.; GONG, G.; YUE, Y.; XING, F.; ZHOU, Y.; HU, B. **Performance evaluation of recycled aggregate concrete incorporating limestone calcined clay cement (LC3).** Journal of Cleaner Production, 366, 2022.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1920-12: Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method.** Geneva, Switzerland, 2015.

KAPOOR, K.; SINGH, S.; SINGH, S. **Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures.** Construction and Building Materials, v. 128, p. 67–76, 2016.

KIM, J. J.; YOUN, S. H.; CHO, M. J.; SHIN, H. T.; YOON, J. B.; HWANG, K. H.; LEE, D. S. **The Recycled Aggregates with Surface Treatment by Pozzolanic.** Key Engineering Materials, v. 287. 2005

KIOURANIS, A.; MIRANDA, L.F.R.; MELO NETO, A.A. **Agregados reciclados em concretos: Uma análise crítica das propriedades e classificações estabelecidas em diferentes normas.** Evento: XVI Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído: Desafios e perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo, 2016.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates.** Cement and Concrete Composites, v. 32. 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate.** Construction and building materials, v. 35, 2012.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash.** Cement and Concrete Composites, 37, 2013.

KOU, S. C.; POON, C. S.; AGRELA, F. **Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures.** Cement & Concrete Composites, v. 33, 2011.

LARA, P. L. DE O. **Análise da Relação Entre Propriedade de Transporte de Água e Os Mecanismos de Corrosão das Armaduras.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

LEEDY, P. D.; ORMROD, J. E. **Practical Research: Planning and Design.** Pearson Education, 2016.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de doutoramento - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2001.

LI, L.; XUAN, D.; SOJOBI, A. O.; LIU, S.; POON, C. S. **Efficiencies of carbonation and nanosilica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, 308, 2021.

LIANG, C.; MA, H.; PAN, Y.; MA, Z.; DUAN, Z.; HE, Z. **Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate.** Construction and Building Materials 218, 2019.

LOVATO, P. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007.

LU, B.; SHIA, C.; CAO, Z.; GUO, M.; ZHENG, J. **Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete.** Journal of Cleaner Production 233, 2019.

LU, Z.; TAN, Q.; LIN, J., WANG, D. **Properties investigation of recycled aggregates and concrete modified by accelerated carbonation through increased temperature.** Construction and Building Materials, 341, 2022.

MAIA, V. S. **Avaliação da Perda de Capacidade Portante de Vigas de Concreto Armado Danificadas Pela Corrosão das Armaduras de Flexão.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

MATIAS, D.; DE BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. **Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 26, 2014.

MARINKOVIC, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIC, I. **Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete.** Waste Management v.30, 2010.

MEDEIROS, M.H.F.; RAISDORFER, J.W.; HOPPE FILHO, J. **Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c.** Ambiente Construído. 2017

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. Sao Paulo: IBRACON, 751 p., 2014.

MENDES, M. V. A. S. **Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MIRANDA, L. R. M. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais.** Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2018.

MUDULI, R; MUKHARJEE, B. B. **Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete.** Journal of Cleaner Production v.209. 2019.

MUDULI, R; MUKHARJEE, B. B. **Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach.** Construction and Building Materials, v. 233. 2020.

MUKHARJEE, B.B.; BARAI, S.V. **Development of construction materials using nanosilica and aggregates recycled from construction and demolition waste.** Waste Manag. Res. v.33. 2015.

NANYA, C. S. **O uso de resíduo da construção civil como substituto de agregados naturais em concretos: avaliação de alguns parâmetros de durabilidade.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. 2018.

NEVES, I. B. F. **Avaliação da Carbonatação em Argamassas de Cimento com Adição de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e Cristalina.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

NEVILLE, A.M. **Properties of concrete.** 3 ed. Inglaterra: Longman Scientific & Technical. 2013.

NORDTEST METHOD. NT BUILD. **492:2011 - Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.** 2011.

NOURYON. The pure component for performance. **Levasil colloidal silica**, CB45, 2019.

ORDÓÑEZ, S. T. L. **Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 155, 2003.

PACHECO, J.; BRITO, J. **Recycled Aggregates Produced from Construction and Demolition Waste for Structural Concrete: Constituents, Properties and Production.** Materials v.14. 2021

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement.** Construction and Building Materials, v. 147. 2017

PEREIRA, M. M. L. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis com resíduo de marmoraria.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

PESSÔA, P. O. A. **Avaliação da Influência do Consumo de Cimento na Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto Carbonatadas.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

POZZAN, E. **Interação Entre Os Mecanismos de Transporte de Cloretos e a Estrutura Interna do Concreto em Diferentes Condições de Carbonatação.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

PURUSHOTHAMAN, R.; AMIRTHAVALLI, R. R.; KARAN, L. **Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, 2015.

RADONJANIN, V.; MALESEV, M.; MARINKOVIC, S.; AL MALTY, A.E.S. **Green recycled aggregate concrete.** Construction and Building Material, v. 47, 2013.

RAHAL, K. **Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.** Building and Environment, v. 42. 2007.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

RATO, V. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.** 2006.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX - RILEM. **TC 121-DRG: Specifications for concrete with recycled aggregates.** *Materials and Structures*, v. 27, Paris, 1994.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX - RILEM. **TC 116- PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete.** *Materials and Structures*, v. 32, 1999.

SANTANA, T. S. **Avaliação da Influência da Utilização de Agregado Miúdo Reciclado em Argamassas Estabilizadas.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SANTOS, L. **Avaliação da Resistividade Elétrica do Concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2006.

SASANIPOUR, H.; ASLANI, F.; TAHERINEZHAD, J. **Chloride ion permeability improvement of recycled aggregate concrete using pretreated recycled aggregates by silica fume slurry.** *Construction and Building Materials*, v.270. 2021.

SHABANA, W. M.; YANG, J.; SU, H.; LIU, Q.; TSANG, D. C.W.; WANG, L.; XIE, J.; LI, L. **Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry.** *Construction and Building Materials* v.216. 2019.

SHAIKH, F.; CHAVDA, V.; MINHAI, N.; AREL, H. **Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete.** *Structural Concrete* v.19. 2018.

SHI C.; LI Y.; ZHANG J.; LI W.; CHONG L.; XIE Z. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review.** *Journal of Cleaner Production*, v. 112, 2016.

SILVA, V. B. DA. **Avaliação da Eficiência de Pastilhas Galvânicas na Proteção/Recuperação de Estruturas de Concreto Sujeitas Ou Submetidas a Corrosão das Armaduras Por Cloretos.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

SILVA, C. M. M. A. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, 2019.

SILVA, C. M. M. A.; CAPUZZO, V.M.S. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios.** Revista Matéria, v.25 n.01. 2020

SILVA, R.; BRITO, J.; DHIR, R. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** Construction and Building Materials, v.65, 2014.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição Ao Estudo da Relação Entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto – Aplicação Ao Uso de Entulho Como Agregado Reciclado.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SOUSA, M. I. C.; REGO, J. H. S. **Effect of nanosilica/ metakaolin ratio on the calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H) formed in ternary cement pastes.** Journal of Building Engineering, v.38, 2021

SOUZA, A. L. R. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. **Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production.** Journal of Cleaner Production, v. 133, 2016.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** Cement and Concrete Research, v. 35, 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. **Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMAsc.** Construction and Building Materials, v. 22, 2008.

TAM, V. W. Y.; WATTAGE, H.; LE, K. N.; BUTERAA, A.; SOOMRO, M. **Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review.** Construction and Building Materials, v.270. 2021

TAM, V.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C.; HADDAD, A. **Deformation and permeability of recycled aggregate concrete – A comprehensive review.** Journal of Building Engineering, 44, 2021b.

TANG, A.J.; DE JESUS, R.; CUNANAN, A. **Microstructure and mechanical properties of concrete with treated recycled concrete aggregates.** International Journal of GEOMATE, v.16, 2019.

VÁZQUEZ, E.; BARRA, M.; APONTE, D.; JIMÉNEZ, C.; VALLS, S. **Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment.** Construction and Building Materials v. 67. 2014.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2004.

WANG, R.; YU, N.; LI, Y. **Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review.** Construction and Building Materials, v. 242, 2020.

WANG, J.; ZHANG, J.; CAO, D.; DANG, H.; DING, B. **Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete.** Construction and Building Materials, v.234, 2020.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. **Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates.** Cement and Concrete Composites, v.65, 2016.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. **Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates.** Cement and Concrete Composites, v. 84, 2017.

ZENG, W.; ZHAO, Y.; ZHENG, H.; POON, C.S. **Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates.** Cement and Concrete Composites, v.106, 2020.

ZHANG, J.; SHI, C.; LI, Y.; PAN, X.; POON, C. S.; XIE, Z. **Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27. 2015.

ZHANG, J.; SHI, C.; LI, Y.; PAN, X.; POON, C. S.; XIE, Z. **Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar.** Construction and Building Materials, v. 98, 2015b.

ZHIHUI, Z.; SHOUDE, W.; LINGCHAO, LU.; CHENCHEN, G. **Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar.** Construction and Building Materials, v.43, 2013.

ZHU, L.; NING, Q.; HAN, W.; BAI, L. **Compressive strength and microstructural analysis of recycled coarse aggregate concrete treated with silica fume.** Construction and Building Materials, 334, 2022.

APÊNDICES

Tabela A.1 - Valores individuais de resistência à compressão simples (MPa).

Idade (dias)	CREF			CARC			CARC-CP		
	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão
1	24,01	24,05	0,07	22,06	20,56	1,43	20,00	20,08	0,07
	24,13			19,21			20,10		
	24,00			20,42			20,13		
3	30,46	31,06	1,03	30,96	30,98	0,11	31,75	31,28	0,54
	30,46			31,10			31,41		
	32,25			30,88			30,68		
7	35,76	35,44	1,01	37,12	36,16	0,87	35,10	35,79	0,60
	36,25			35,42			36,15		
	34,31			35,94			36,13		
28	40,34	41,24	0,80	39,58	40,83	1,08	39,21	39,63	0,49
	41,83			41,38			39,50		
	41,55			41,51			40,17		
253	38,85	40,81	1,91	39,87	39,97	0,31	37,65	37,45	0,83
	42,67			40,31			38,16		
	40,91			39,72			36,54		
Idade (dias)	CARC-CPMK			CARC-CPMKNS			CARC-Carb		
	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão
1	17,81	17,29	0,46	17,92	16,70	1,30	21,23	20,92	0,51
	17,13			15,33			20,33		
	16,94			16,84			21,20		
3	31,10	31,89	0,99	32,06	32,91	1,10	31,51	33,42	1,69
	31,56			32,54			34,71		
	33,00			34,15			34,03		
7	39,95	41,46	1,73	44,45	45,40	0,84	39,76	40,11	1,95
	43,35			45,70			38,36		
	41,07			46,06			42,22		
28	47,10	49,38	2,07	48,10	50,86	2,45	47,75	46,52	1,64
	51,15			52,80			47,16		
	49,89			51,68			44,66		
253	49,05	48,01	1,22	53,16	47,78	4,74	47,95	44,87	2,68
	46,67			45,97			43,65		
	48,31			44,21			43,02		

Tabela A.2 - Valores individuais módulo estático de elasticidade à compressão (GPa).

Idade (dias)	CREF			CARC			CARC-CP		
	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão
28	36,05	36,07	0,83	34,10	32,59	1,49	34,36	33,33	0,89
	35,25			32,55			32,84		
	36,90			31,12			32,79		
Idade (dias)	CARC-CPMK			CARC-CPMKNS			CARC-Carb		
	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão
28	35,98	35,96	0,02	35,85	36,19	0,53	35,68	35,29	0,91
	35,94			35,93			35,93		
	35,95			36,80			34,25		

Tabela A.3 - Valores individuais de absorção de água por imersão (%) e índice de vazios (%).

Idade (dias)	Ensaio	CREF			CARC			CARC-CP		
		Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão
253	Absorção imersão (%)	4,44	4,45	0,05	4,89	5,02	0,14	4,83	4,84	0,07
		4,40			4,99			4,91		
		4,49			5,16			4,77		
	Índice de Vazios (%)	10,08	10,14	0,09	10,90	11,13	0,23	10,83	10,82	0,13
		10,09			11,12			10,94		
		10,24			11,37			10,67		
Idade (dias)	Ensaio	CARC-CPMK			CARC-CPMKNS			CARC-Carb		
		Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão
253	Absorção imersão (%)	4,76	4,78	0,27	4,53	4,67	0,14	4,34	4,39	0,09
		4,52			4,80			4,50		
		5,06			4,68			4,32		
	Índice de Vazios (%)	10,84	10,89	0,59	10,16	10,50	0,31	10,05	10,14	0,21
		10,33			10,77			10,38		
		11,51			10,57			9,99		

Tabela A.4 - Valores individuais de absorção de água por capilaridade (g/cm²) e ascensão capilar (mm).

Idade (dias)	Ensaio	CREF			CARC			CARC-CP		
		Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão
253	Absorção Capilar. (g/cm ³)	0,25	0,33	0,13	0,41	0,41	0,03	0,37	0,32	0,05
		0,27			0,43			0,26		
		0,48			0,37			0,34		
	Ascensão capilar (mm)	68,28	73,18	15,51	83,43	85,40	8,61	63,60	65,41	5,25
		60,72			94,82			61,31		
		90,55			77,94			71,33		
Idade (dias)	Ensaio	CARC-CPMK			CARC-CPMKS			CARC-Carb		
		Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão	Valores	Valor médio	Desvio padrão
253	Absorção Capilar. (g/cm ³)	0,23	0,21	0,02	0,19	0,18	0,02	0,48	0,41	0,07
		0,22			0,19			0,34		
		0,18			0,16			0,42		
	Ascensão capilar (mm)	48,52	47,36	2,31	41,92	39,57	3,68	95,81	85,50	12,89
		48,87			41,45			71,05		
		44,70			35,33			89,64		

Tabela A.5 - Valores individuais da frente de carbonatação dos concretos (mm) aos 253 dias de idade e 211 dias de carbonatação.

	CREF						CARC						CARC - CP					
1	2,98	7,60	3,46	6,29	4,50	5,57	6,13	5,87	4,82	3,82	3,70	4,07	5,53	6,57	6,38	9,74	5,26	6,07
2	4,02	5,10	4,49	8,58	4,17	8,73	4,05	3,89	7,65	4,44	6,34	4,51	5,52	5,15	3,59	5,69	4,76	5,81
3	5,94	4,91	3,74	9,30	3,28	7,51	2,85	4,67	7,31	4,89	8,24	6,02	5,25	6,71	5,46	6,76	5,63	6,98
4	4,04	1,52	4,45	6,48	4,59	10,17	3,84	4,52	10,65	8,21	4,66	5,01	5,01	6,26	5,09	7,83	5,54	7,22
5	2,48	1,98	6,16	4,83	5,14	5,91	3,57	5,32	6,76	9,56	3,10	3,91	3,43	7,56	4,99	6,58	5,49	8,54
6	4,05	2,21	3,12	7,76	5,40	6,22	4,61	4,07	3,48	5,75	5,82	6,11	4,15	7,31	4,60	2,99	4,94	3,53
7	4,23	5,34	8,17	6,61	5,40	5,35	2,19	5,98	3,15	5,01	8,12	4,73	5,09	4,87	4,72	3,06	6,21	3,54
8	3,58	4,13	6,33	7,03	2,62	6,86	4,03	5,19	6,68	3,08	7,52	4,28	5,40	4,78	5,14	7,98	6,23	10,60
9	1,71	3,57	4,63	8,84	4,14	6,32	2,93	4,82	4,34	3,07	5,58	3,65	5,39	3,69	7,78	4,94	7,33	6,37
10	2,24	4,92	4,35	7,30	3,95	4,37	2,35	3,39	3,50	5,82	7,89	4,85	5,03	4,97	6,28	3,13	5,18	7,52
Média 1	3,53	4,13	4,89	7,30	4,32	6,70	3,66	4,77	5,83	5,37	6,10	4,71	4,98	5,79	5,40	5,87	5,66	6,62
Média 2	3,83		6,10		5,51		4,21		5,60		5,41		5,38		5,64		6,14	
Média 3	5,14						5,07						5,72					
	CARC - CPMK						CARC - CPMKNS						CARC-Carb					
1	4,54	7,13	9,84	6,91	8,37	9,01	7,02	9,44	8,03	8,28	11,73	9,36	4,77	5,12	4,96	5,84	6,18	6,13
2	4,91	7,70	7,44	9,11	7,82	11,74	7,47	10,25	9,70	9,37	9,31	8,80	4,68	4,66	4,39	2,58	6,65	3,74
3	4,88	4,20	7,13	9,25	9,60	9,29	7,62	7,71	8,46	8,69	10,22	9,21	5,00	4,68	4,15	4,74	6,70	6,73
4	5,95	5,04	10,70	9,08	8,55	10,18	4,10	8,46	7,95	8,70	9,45	8,41	4,61	2,86	5,37	4,78	5,77	4,67
5	8,61	7,13	7,84	10,35	10,02	9,54	5,45	7,10	9,83	9,52	10,25	8,07	5,84	3,01	5,22	4,72	6,83	6,17
6	7,18	8,01	8,40	7,63	9,82	6,73	5,77	7,17	8,14	7,81	9,63	9,92	4,76	4,65	5,01	4,91	5,60	4,51
7	7,77	8,86	7,71	7,06	7,63	8,33	5,81	7,81	8,07	8,59	10,05	7,69	5,07	5,32	4,22	5,62	6,13	6,85
8	6,60	7,99	8,46	6,35	7,35	8,79	6,61	6,18	7,35	8,69	9,17	9,88	6,26	5,42	4,23	4,56	7,04	4,20
9	7,26	6,48	8,68	7,24	6,71	8,08	5,53	7,62	6,98	9,73	8,10	9,42	4,30	4,88	4,32	4,09	5,05	5,29
10	6,88	12,68	8,40	7,81	8,55	7,26	6,12	4,77	9,83	9,52	7,91	8,45	7,17	8,18	5,28	6,24	5,11	4,01
Média 1	6,46	7,52	8,46	8,08	8,44	8,90	6,15	7,65	8,43	8,89	9,58	8,92	5,25	4,88	4,72	4,81	6,11	5,23
Média 2	6,99		8,27		8,67		6,90		8,66		9,25		5,06		4,76		5,67	
Média 3	7,98						8,27						5,16					

Tabela A.6 - Parâmetros de ensaio e resultados individuais de migração de cloretos aos 253 dias.

TRAÇO		CREF				CARC				CARC-CP			
Tempo de ensaio (h)		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Tensão inicial (V)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Corrente p/ 30 V (mA)		76,6	87,9	77,1	126,8	81,9	76,2	112,8	128	50,6	68,6	53,8	61,7
Nova tensão (V)		25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30
Corrente inicial (mA)		63,8	74,6	64,8	103,5	69,1	64,7	94,9	107,3	51,7	71,4	56	62,5
Corrente Final (mA)		139,9	167,9	139,4	172,4	125,3	115,3	127,7	277,2	80,9	133,7	75,8	138,7
Temp. inicial (°C)		24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. final (°C)		24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25
Espessura média (mm)	<i>e1</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	<i>e2</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	<i>e3</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Frente de penetração de cloretos (mm)	<i>x1</i>	8,08	5,65	6,18	5,65	4,53	6,72	9,65	3,94	3,89	7,25	8,15	4,64
	<i>x2</i>	7,51	5,26	7,63	5,53	4,55	5,61	5,76	6,26	4,3	11,19	4,71	6,19
	<i>x3</i>	7,15	7,75	7,43	7,16	5,25	7,07	6,11	6,37	4,48	4,39	6,78	6,57
	<i>x4</i>	5,35	3,77	6,88	7,19	4,97	7,48	6,26	6,24	8,06	6,78	9,19	8,07
	<i>x5</i>	6,69	4,74	6,27	6,2	5,81	6,45	5,84	6,03	5,81	6,07	5,77	8,27
	<i>x6</i>	5,53	5,16	6,99	4,66	5,69	5,5	4,48	5,67	8,48	5,91	5,3	8,78
	<i>x7</i>	7,75	4,17	6,16	4,83	6,15	6,23	5,81	4,09	6,61	4,42	8,73	7,16
Coeficiente de migração (10^{-12} m ² /s)		4,12	3,09	4,07	3,51	3,14	3,86	3,76	3,29	2,94	3,26	3,46	3,53
Coeficiente de migração (10^{-12} m ² /s)		3,70				3,51				3,30			
Desvio padrão (10^{-12} m ² /s)		0,49				0,35				0,26			
Coeficiente de variação (%)		13,22				10,02				7,98			
TRAÇO		CARC-CPMK				CARC-CPMKNS				CARC-Carb			
Tempo de ensaio (h)		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Tensão inicial (V)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Corrente p/ 30 V (mA)		11,95	15,84	10,95	8,15	8,75	25,45	21,06	18,42	53	42,7	44,7	40,3
Nova tensão (V)		60	60	60	60	40	40	40	40	30	30	30	30
Corrente inicial (mA)		24,16	39,76	22,44	17,39	12,04	35,19	30,6	25,943	54,3	40,3	45,5	40,2
Corrente Final (mA)		28,38	40,2	25,55	20,07	106,9	107,3	42,9	85,7	80,8	97,6	69,1	60,5
Temp. inicial (°C)		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. final (°C)		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Espessura média (mm)	<i>e1</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	<i>e2</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	<i>e3</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Frente de penetração de cloretos (mm)	<i>x1</i>	5,06	5,85	6,07	6,87	2,14	4,35	5,44	1,61	3,95	3,63	5,3	5,05
	<i>x2</i>	9,96	2,33	6,72	3,53	3,26	6,7	4,41	2,22	4,35	5,23	5,74	4,9
	<i>x3</i>	5,04	4,25	10,26	8,65	2,08	5,7	4,3	1,95	4,35	5,41	5,19	6,43
	<i>x4</i>	6,53	3,35	7,27	4,18	2,21	6,31	3,52	1,45	6,12	5,48	7,05	6,02
	<i>x5</i>	8,38	8,88	2,9	5,56	1,68	5,45	5,6	0	7,05	5,11	9,58	7,23
	<i>x6</i>	5,91	5,04	6,72	5,72	1,05	3,27	4,92	0	5,12	4,73	5,12	6,09
	<i>x7</i>	6,15	10,21	6,18	7,93	1,54	4,02	4,95	0	4,85	4,08	4,17	4,1
Coeficiente de migração (10^{-12} m ² /s)		1,64	1,39	1,61	1,48	0,70	1,87	1,73	0,34	2,51	2,36	2,98	2,81
Coeficiente de migração (10^{-12} m ² /s)		1,53				1,16				2,67			
Desvio padrão (10^{-12} m ² /s)		0,12				0,76				0,28			
Coeficiente de variação (%)		7,72				65,04				10,52			