

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**O USO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO  
SUBSTITUTO DE AGREGADOS NATURAIS EM CONCRETOS:  
AVALIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS DE DURABILIDADE**

Carolina Shimomura Nanya

São Carlos

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO**  
**CIVIL**

**O USO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO**  
**SUBSTITUTO DE AGREGADOS NATURAIS EM CONCRETOS:**  
**AVALIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS DE DURABILIDADE**

Carolina Shimomura Nanya

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Valdirene Maria da Silva Capuzzo

São Carlos

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

---

Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Carolina Shimomura Nanya, realizada em 03/05/2018:

---

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira  
UFSCar

---

Prof. Dr. Almir Sales  
UFSCar

---

Profa. Dra. Juliana Petermann Moretti  
PUCMinas

p/

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Juliana Petermann Moretti e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

---

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

## AGRADECIMENTOS

---

Primeiramente agradeço a Deus por ter me iluminado e me guiado durante esta jornada.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram nos estudos, sendo este prioridade em nossa casa.

À minha orientadora Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira e coorientadora Profa. Dra. Valdirene Maria da Silva Capuzzo, que me apoiaram desde o início, quando decidiram realizar esta parceria UFSCar-UnB e acreditaram que seria possível (mesmo que a dúvida tenha permeado em alguns momentos). São pessoas que sempre irão me inspirar, em termos pessoais e como educadoras, que de fato fomentam a pesquisa, que nosso país Brasil tanto necessita.

Aos meus amigos Netto, Ferdis e Edson, que me apoiaram em diferentes momentos durante esta jornada.

À minha amiga Stephanie, que além de acompanhar as etapas desse mestrado diretamente, atuou como revisora de muitos dos meus textos.

À ajuda durante os trabalhos de laboratório, dada pelo Johnatan e Calebe, imprescindível durante os trabalhos iniciais.

Aos técnicos Saimo, do Laboratório de Geotecnia da UnB (Universidade de Brasília), Filipe, do Laboratório de Elétrica da UnB, Emerson e Patrícia, ambos do Laboratório de Ensaio de Materiais, também da UnB, pelo auxílio com os ensaios a serem realizados.

A todos os meus amigos que souberam interpretar que a minha ausência não era inimizade, e compreender que este tempo era necessário para que um sonho se tornasse realidade.

Agradeço a todos, que de alguma maneira, me ajudaram para a realização deste trabalho.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.” (Albert Einstein)

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	15
<b>2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC.....</b>	<b>16</b>
2.1 DEFINIÇÃO.....	16
2.2 NORMAS E LEGISLAÇÕES.....	18
2.3 GERAÇÃO DE RCC.....	18
2.4 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) .....	19
<b>3. USO DO MATERIAL RECICLADO COMO AGREGADO.....</b>	<b>22</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS .....	22
3.1.1 Composição granulométrica .....	22
3.1.2 Massa específica.....	23
3.1.3 Absorção de água .....	24
3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO.....	26
3.2.1 Trabalhabilidade .....	26
3.2.2 Resistência à compressão.....	29
3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral .....	30
3.2.4 Módulo de elasticidade.....	31
3.2.5 Absorção de água e porosidade .....	32
3.2.6 Resistividade elétrica.....	34
3.2.6.1 Resistividade elétrica volumétrica.....	37
3.2.6.2 Resistividade elétrica superficial.....	38
<b>4. DURABILIDADE DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO.....</b>	<b>45</b>
4.1 TRANSPORTE DOS AGENTES AGRESSIVOS NO CONCRETO .....	46
4.2 CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	49
4.3 AÇÃO DOS ÍONS CLORETO.....	51
4.4 AÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	56
4.5 AÇÃO COMBINADA DO CO <sub>2</sub> E ÍONS CLORETO .....	61

<b>5.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>65</b>
5.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	67
5.1.1	Cimento Portland.....	67
5.1.2	Agregado miúdo natural .....	67
5.1.3	Agregado graúdo natural .....	67
5.1.4	Agregado graúdo reciclado.....	67
5.1.5	Aditivo .....	69
5.1.6	Água.....	69
5.2	DOSAGEM DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	69
5.3	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DOS CONCRETOS .....	72
5.3.1	Resistência à compressão simples.....	72
5.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	72
5.3.3	Módulo de elasticidade .....	72
5.3.4	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica .....	73
5.3.5	Absorção de água por capilaridade .....	73
5.4	AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS .....	74
5.4.1	Resistividade elétrica.....	74
<b>5.4.1.1</b>	<b>Resistividade elétrica volumétrica .....</b>	<b>74</b>
<b>5.4.1.2</b>	<b>Resistividade elétrica superficial .....</b>	<b>75</b>
5.4.2	Profundidade de penetração dos íons cloreto.....	76
5.4.3	Profundidade de carbonatação acelerada .....	78
5.4.4	Ação combinada da carbonatação e íons cloreto .....	79
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	80
6.1.1	Cimento Portland.....	80
6.1.2	Agregado miúdo natural .....	81
6.1.3	Agregado graúdo natural .....	82
6.1.4	Agregado graúdo reciclado.....	83
6.1.5	Aditivo .....	86
6.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO .....	86

6.2.1	Massa específica.....	86
6.2.2	Consistência.....	87
6.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	87
6.3.1	Resistência à compressão simples.....	87
6.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	90
6.3.3	Módulo de elasticidade.....	91
6.3.4	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica .....	93
6.3.5	Absorção de água por capilaridade .....	96
6.3.6	Resistividade elétrica.....	97
6.3.7	Profundidade de penetração de íons cloreto .....	102
6.3.8	Profundidade de carbonatação.....	105
6.3.9	Ação combinada da carbonatação e íons cloretos.....	107
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>112</b>
7.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	114

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REMOÇÃO DA ARGAMASSA ADERIDA AO AGREGADO RECICLADO PELO PROCESSO DE FRICÇÃO (NAWA, 2010).....	20
FIGURA 2 - REMOÇÃO DA ARGAMASSA ADERIDA AO AGREGADO RECICLADO PELO PROCESSO DE AQUECIMENTO (ADAPTADO DE NAWA, 2010).....	21
FIGURA 3 – VOLUME DE MERCÚRIO X TAMANHO DOS POROS DO CONCRETO, EM FUNÇÃO DE TEORES CRESCENTES DE SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO (FONTE: GÓMES; SOBERÓN, 2002).....	34
FIGURA 4 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA (FONTE: ADAPTADO DE AASHTO TP 119-15)..	37
FIGURA 5 – SONDA WENNER DE 4 ELETRODOS (ADAPTADO DE BEUSHAUSEN, 2015) .....	39
FIGURA 6 – DIMENSÃO DOS POROS RELACIONADOS COM OS PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRANSPORTE (FONTE: HELENE, 1993) .....	47
FIGURA 7 - .PROGRESSÃO DA CORROSÃO DO AÇO E FORMAÇÃO DE PRODUTOS EXPANSIVOS: A) PROCESSO CORROSIVO, E B) FORMAÇÃO DE PRODUTOS EXPANSIVOS DE CORROSÃO (ADAPTADO DE LI, 2011) .....	50
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA NA PRESENÇA DE CLORETOS (FONTE: NEVILLE, 2011) .....	52
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE PENETRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> POR DIFUSÃO E DO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO. (FONTE: ADAPTADO DE FREIRE, 2005) .....	56
FIGURA 10 - ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	66
FIGURA 11 – AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS: A) BRITA COM DMÁX = 19,0 MM E DMÁX = 12,5 MM ...	67
FIGURA 12 - AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS A) DMÁX IGUAL A 25,0 MM, B) DMÁX IGUAL A 9,5 MM .....	68
FIGURA 13 – UNIDADE DE PROCESSAMENTO EMPREGADO NO PROCESSO DE RECICLAGEM DOS AGREGADOS RECICLADOS .....	68
FIGURA 14 – PRÉ MOLHAGEM DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	71
FIGURA 15- CURVA DE ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) ....	71
FIGURA 16 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO NA UNB PARA ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA.....	75
FIGURA 17 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO NA UNB PARA ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL .....	76

FIGURA 18 – ENSAIO DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO POR CICLOS DE SECAGEM E MOLHAGEM (FONTE: SILVA, 2006) .....	77
FIGURA 19 – PROCEDIMENTO SEQUENCIAL DO ENSAIO DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO (FONTE: MOTA, 2011) .....	77
FIGURA 20 – CÂMARA DE CARBONATAÇÃO DA UNB .....	78
FIGURA 21 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	81
FIGURA 22 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA COMPOSIÇÃO ENTRE OS AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS	83
FIGURA 23 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO (DMÁX = 25,0 MM) .....	84
FIGURA 24 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO (DMÁX = 9,5 MM).....	85
FIGURA 25 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CONCRETOS.....	88
FIGURA 26 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS .....	90
FIGURA 27 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS ESTUDADOS AOS 28 DIAS.....	91
FIGURA 28 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS CONCRETOS ANALISADOS.....	93
FIGURA 29 - ÍNDICE DE VAZIOS (%) DOS CONCRETOS ANALISADOS .....	93
FIGURA 30 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CONCRETOS REF, 30RCC, 50RCC, 70RCC E 100RCC .....	95
FIGURA 31 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DOS CONCRETOS DURANTE O PERÍODO DO ENSAIO.....	96
FIGURA 32 – ALTURAS CAPILARES DOS TRAÇOS.....	97
FIGURA 33 –RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DOS CONCRETOS REF, 30% RCC E 50% RCC AOS 28 DIAS, 63 DIAS E 114 DIAS.....	98
FIGURA 34 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS CONCRETOS POR TRAÇO (REF, 30% RCC E 50% RCC) AOS 28, 63 E 114 DIAS .....	100
FIGURA 35 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS NOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC, AOS 28, 63 E 91 DIAS, APÓS EXPOSIÇÃO À SOLUÇÃO DE 3,5% NaCl .....	102
FIGURA 36 – FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS ALGUMAS HORAS DE ASPERSÃO DA SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA, NA IDADE DE 28 DIAS .....	103
FIGURA 37 - FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS ALGUMAS HORAS DE ASPERSÃO DA SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA, NA IDADE DE 63 DIAS .....	104
FIGURA 38 - FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS ALGUMAS HORAS DE ASPERSÃO DA SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA, NA IDADE DE 91 DIAS .....	104
FIGURA 39 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO TRAÇO REF, AOS 28 DIAS.....	106
FIGURA 40 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO TRAÇO 30RCC, AOS 28 DIAS .....	106

FIGURA 41 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO TRAÇO 50RCC, AOS 28 DIAS .....	106
FIGURA 42 - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS NOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC, AOS 28, 63 E 91 DIAS, APÓS EXPOSIÇÃO À SOLUÇÃO DE 3,5% NaCl (APÓS TER SIDO SUBMETIDO AÇÃO DO CO <sub>2</sub> ) .....	107
FIGURA 43 - FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS CARBONATAÇÃO, NA IDADE DE 28 DIAS .....	109
FIGURA 44 - FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS CARBONATAÇÃO, NA IDADE DE 63 DIAS .....	109
FIGURA 45 - FRENTE DE PENETRAÇÃO DOS CONCRETOS REF, 30RCC E 50RCC APÓS CARBONATAÇÃO, NA IDADE DE 91 DIAS .....	110

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADOS RECICLADOS, SEGUNDO AUTORES (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	24
TABELA 2 – PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO AGREGADO RECICLADO E AGREGADO NATURAL APRESENTADO EM DIVERSAS PESQUISAS (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	25
TABELA 3 – POROSIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS E AGREGADO NATURAL APRESENTADA NAS PESQUISAS (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	25
TABELA 4 – TRABALHABILIDADE OBTIDA PARA O CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO E AGREGADOS NATURAIS DE DIVERSAS PESQUISAS (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .	27
TABELA 5 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL OBTIDA PARA O CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO E AGREGADOS NATURAIS DE DIVERSAS PESQUISAS (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	31
TABELA 6 – VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA INDICATIVOS DA PROBABILIDADE DE CORROSÃO DO CONCRETO, SEGUNDO A CEB-192 E O BOLETIM EUROPEU COST 509 (FONTE: RIBEIRO <i>ET AL.</i> , 2014) .....	35
TABELA 7 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO (FONTE: AASHTO TP 119-15).....	35
TABELA 8 – VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO .....	36
TABELA 9– PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO: COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE DIVERSOS AUTORES (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	41
TABELA 10 – TEOR MÁXIMO DE ÍONS CLORETO PARA PROTEÇÃO DAS ARMADURAS DE CONCRETO (FONTE: ABNT NBR 12655:2015).....	51
TABELA 11 – ÍONS CLORETO NO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO (FONTE: PRÓPRIO AUTOR).....	53
TABELA 12 – PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO BASEADO NA QUANTIDADE DE CARGA PASSANTE (ADAPTADO DE ASTM C1202).....	55
TABELA 13– PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (MM) DE DIFERENTES AUTORES (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	59
TABELA 14 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (MM) OU INGRESSO DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS CONVENCIONAIS – AÇÃO ISOLADA DOS AGENTES AGRESSIVOS (FONTE: PRÓPRIO AUTOR).....	62

TABELA 15 – AÇÃO COMBINADA DOS AGENTES AGRESSIVOS (CARBONATAÇÃO E CLORETOS) (FONTE: PRÓPRIO AUTOR) .....	63
TABELA 16 - TRAÇO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA (REF) E DOS CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO (30RCC, 50RCC, 70RCC E 100RCC).....	70
TABELA 17 – RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS E MÉTODOS EMPREGADOS .....	72
TABELA 18 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO PORTLAND .....	80
TABELA 19 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND.....	80
TABELA 20 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO .....	81
TABELA 21 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO.....	82
TABELA 22 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA COMPOSIÇÃO ENTRE OS AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS 70% AGREGADO COM $D_{MÁX} = 19,0$ MM E 30% DO AGREGADO COM $D_{MÁX}=12,5$ MM. ....	82
TABELA 23 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO (COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS). ....	83
TABELA 24 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO RECICLADO COM $D_{MÁX}= 25,0$ MM .....	84
TABELA 25- DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO RECICLADO COM $D_{MÁX} = 9,5$ M	84
TABELA 26 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS .....	85
TABELA 27 - CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE GLENIUM® 51 (FONTE: BASF S.A) .....	86
TABELA 28 -MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS .....	86
TABELA 29 - CONSUMO DE CIMENTO DOS CONCRETOS.....	86
TABELA 30 - CONSISTÊNCIA DOS CONCRETOS .....	87
TABELA 31 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES AOS 7, 14, 28 E 91 DIAS DOS CONCRETOS.....	87
TABELA 32 - RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS DOS TRAÇOS DE CONCRETO .....	90
TABELA 33 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS (I.V) DOS CONCRETOS .	93
TABELA 34- MASSA ESPECÍFICA SECA, SATURADA E REAL DOS CONCRETOS .....	95
TABELA 35 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	96
TABELA 36 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA OBTIDA PELO MÉTODO DOS DOIS ELETRODOS .....	98

TABELA 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS QUANTO À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, PARA O ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA, DE ACORDO COM A IDADE .....	98
TABELA 38 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL OBTIDA PELO MÉTODO DA SONDA WENNER.....	99
TABELA 39 - CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS QUANTO À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO E RISCO DE CORROSÃO, PARA O ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL, DE ACORDO COM A IDADE .....	100
TABELA 40 – FRENTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO DOS CONCRETOS EXPOSTOS À SOLUÇÃO DE 3,5% DE NaCl .....	102
TABELA 41 - QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE .....	111

## **RESUMO**

---

NANYA, C. S. **O uso de Resíduo de Construção Civil como substituto de agregados naturais em concretos: Avaliação de alguns parâmetros de durabilidade.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

A preocupação com os impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil, que tradicionalmente exige extração de grande quantidade de matérias-primas e gera uma quantia relevante de resíduos, motivou o desenvolvimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos que regulamenta e incentiva a busca de soluções sustentáveis que possam mitigar estes efeitos. Soma-se a isso o aumento da fiscalização sobre o descarte de resíduos e o interesse das empresas construtoras em diminuir seus custos. A utilização do agregado reciclado na produção de concretos convencionais surge então como uma fonte alternativa de matéria-prima. Assim, essa pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de estudar a influência da utilização de agregados de resíduos de construção e demolição em concretos submetidos ao ataque de diferentes agentes agressivos. O estudo apresenta as características dos agregados miúdo e graúdo utilizados, sendo o agregado graúdo reciclado obtido a partir do processo de reciclagem de resíduos da construção civil e coletados no Fornecedor de Areia Bela Vista, localizada em Sobradinho, região de Brasília. Após a caracterização dos materiais, realizou-se a dosagem dos concretos em massa, com substituição dos agregados em volume, em cinco teores de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado: 0%, 30%, 50%, 70% e 100%. A relação água/cimento foi fixada em 0,55, considerando-se uma quantidade adicional de água em função da absorção de água do agregado reciclado. Para manter a trabalhabilidade, empregou-se aditivo superplastificante. As propriedades avaliadas foram: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, profundidade de penetração de íons cloreto, profundidade de carbonatação e resistividade elétrica. Os resultados mostraram a viabilidade da utilização do agregado graúdo reciclado na produção de concretos, considerando-se as propriedades mecânicas dos concretos, posto que cumpre com as exigências especificadas na NBR 12655:2015; e também quanto à durabilidade, pois os resultados obtidos indicaram baixo (CEB 192) e moderado (COST 509) risco de corrosão, para todos os concretos analisados, e tanto a profundidade de penetração de íons cloreto quanto a carbonatação não ultrapassaram a espessura de cobertura do concreto. O teor de substituição de 30% de agregado reciclado apresentou melhores resultados do ponto de vista mecânico e de durabilidade e, portanto, apresenta-se como o teor ideal de substituição para o resíduo de construção.

**Palavras-chave:** concreto; agregado reciclado, durabilidade, penetração de íons cloreto.

## **ABSTRACT**

---

NANYA, C. S. **The use of Civil Construction Waste as a substitute for natural aggregates in concretes: Assessment of some durability parameters.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

The concern about the environmental impacts generated by the construction industry, which traditionally requires large quantities of raw materials and usually generate a large amount of waste, motivated the development of the Solid Waste National Policy that regulates and seek for sustainable solutions that can mitigate these effects. Additionally to this is the increased inspection of waste disposal and the interest of construction companies in reducing their costs, so the use of the recycled aggregate in the production of conventional concrete, appears as an alternative source of raw material. The research was developed with the objective of studying the influence of the use of recycled aggregates of construction and demolition waste in concrete submitted to different aggressive agents. The study presents the granulometric and physical characteristics of fine and coarse aggregates, being the recycled coarse aggregates were obtained from the process of recycling waste from the construction industry and collected at the provider Sand Beautiful View, located in Sobradinho, northern region of Brasília. After the characterization of the materials, the concrete test specimens were dosed by mass, with the substitution of the recycled aggregates in volume, in five replacement contents of the coarse recycled aggregate (0%, 30%, 50%, 70% e 100%). The water cement ratio considered was 0,55 and it was considered an additional amount of water obtained from tests of absorption with the recycled aggregate. In order to maintain the workability it was used superplasticizer additive. It was analyzed the following properties: compressive strength, diametric compression tensile strength, modulus of elasticity, absorption of water by capillarity, water absorption, voids index and specific mass, depth of ions chloride, carbonation and electrical resistivity. The results showed the feasibility of the use of the recycled coarse aggregate in the concrete production, considering the mechanical properties of the concretes, since it complies with the requirements specified in NBR 12655: 2015, and also the durability, since the results indicate low (CEB 192) and moderate (COST 509) risk of corrosion, and the depth of penetration of chloride ions as well as the carbonation did not exceed the concrete cover thickness. The substitution content of 30% of recycled aggregate presented better results from a mechanical and durability point of view and present to be the ideal replacement contend for the construction and demolition waste.

**Key-words:** Concrete, recycled aggregate, durability, penetration of chloride ions.

# 1. INTRODUÇÃO

A motivação desta pesquisa pode ser justificada pela potencialidade do emprego do RCC (Resíduo da Construção Civil) na produção de concretos, apresentando-se como uma alternativa viável que pode contribuir para a diminuição da extração de recursos naturais.

De acordo com Evangelista e Brito (2010), está bem estabelecido que o desempenho de uma mistura de concreto não se limita à determinação de suas propriedades mecânicas, pois é de suma importância que sejam identificados os parâmetros relacionados à durabilidade do material. A vida útil de uma estrutura de concreto e seu desempenho ao longo do tempo está intimamente relacionada com os vários mecanismos de transporte, os quais estão relacionados com os diversos processos de deterioração do concreto (BASHEER, KROPP; CLELAND; 2001).

Quanto às propriedades mecânicas, alguns pesquisadores (GONÇALVES, 2001; LEITE, 2001; MORETTI, 2014; BEHERA *et al.*, 2014; LOTFI *et al.*, 2015; NOGUEIRA, 2015) alcançaram resultados satisfatórios que atenderam as exigências quanto à resistência mecânica especificada na NBR 12655:2015, o que comprova a viabilidade do uso do RCC em substituição ao agregado graúdo natural. Quanto à durabilidade, alguns estudos já identificaram que o concreto produzido com agregado reciclado apresenta um desempenho que atende a vida útil especificada nos projetos (DEBIEB *et al.*, 2010; VÁZQUEZ *et al.*, 2013; SILVA *et al.*; 2015).

A importância de pesquisas com a incorporação de materiais alternativos reside tanto no aspecto ambiental, quanto econômico e social, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país.

O consumo de materiais naturais cresce na mesma proporção do crescimento da economia e da população. A demanda de produção destes grandes volumes de materiais exige uma extração, em larga escala, de matérias-primas, dadas as perdas e resíduos dos processos. Segundo dados do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), para o ano de 2016, foram produzidos no Brasil cerca de 48 milhões de toneladas de cimento Portland. Sendo assim, foram necessários cerca de 336 milhões de toneladas de agregados, conforme proporcionalidade dos materiais apresentada por John (2000), que não considera perdas e o volume de agregados empregado na pavimentação.

Além da problemática que aborda a escassez das reservas de materiais, especialmente junto aos grandes centros, há ainda o encarecimento dos processos de tratamento e disposição, especialmente dos resíduos classificados como perigosos. A

instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) reforça a necessidade de uma nova abordagem ao instituir metas de redução, reutilização e reciclagem dos resíduos, estabelecer normas e diretrizes para a disposição final desse material e tornar mais intenso e severo o controle e fiscalização, especialmente no tocante aos resíduos perigosos (BRASIL, 2011).

De acordo com Limbatchiya *et al.* (2012), a tendência recente na indústria da construção é a utilização de fontes alternativas de materiais de construção que possam substituir a utilização de materiais naturais e que possam reduzir o impacto ambiental em termos de consumo de energia, poluição, eliminação de resíduos e aquecimento global. Segundo Silva *et al.* (2014) existe um elevado potencial de reutilização e reciclagem dos materiais da construção civil, posto que há uma demanda de mercado para estes materiais, os quais podem ser empregados tanto na área de infraestrutura, na construção de estradas, quanto na produção de argamassas e concretos.

## **1.1 Justificativa**

De modo a esclarecer a contribuição desta pesquisa, apresentam-se diversos impactos previstos no âmbito social, econômico, técnico, científico e ambiental de modo a comprovar a necessidade de estudos que contribuam para o aprimoramento do uso de resíduos como componente de materiais da construção civil.

É válido ressaltar que a presente pesquisa contribui para os estudos de durabilidade do concreto com agregado reciclado, posto que não foi identificada bibliografia que aborde a ação combinada da carbonatação e cloretos neste material e, sendo assim, torna-se oportuno o desenvolvimento deste estudo quanto a este aspecto.

Quanto aos impactos ambientais, segundo Limbatchiya *et al.* (2012), as questões de sustentabilidade constituem uma das principais preocupações nos dias atuais pois uma grande quantidade de recursos naturais é necessária para produzir materiais como o concreto. O autor salienta que esta questão do esgotamento dos recursos naturais deve ser abordada de forma eficiente. A reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens potenciais do ponto de vista da sustentabilidade. A primeira e mais visível das contribuições ambientais é a preservação dos recursos naturais, substituídos por resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora (JOHN, 2000).

Um outro ponto a ser considerado é que a reciclagem de resíduos pode permitir a redução do consumo energético (EPA, 1998; JOHN, 1999) porque muitas vezes os

materiais já incorporam energia, posto que a produção de materiais consome considerável quantidade de energia, especialmente quando se leva em conta o volume de produção.

De acordo com Graf (2011), energia incorporada é toda energia empregada para a fabricação dos materiais utilizados na construção de um espaço, o que inclui desde a extração até o destino final no sítio da obra. A energia utilizada no processo de reciclagem dos materiais é muito menor do que a energia necessária para a produção de agregados naturais (FLORES, 2011), a demanda energética para extração do agregado natural nas jazidas é elevada, além do processo de britagem do material também requerer alto consumo de energia. Assim, há um interesse crescente pela substituição de agregados naturais por agregados alternativos reciclados derivados de diferentes construções e demolições, permitindo ainda a redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto, conforme afirma John (2000).

Uma outra questão que deve ser levada em consideração é a questão da emissão de CO<sub>2</sub> e consumo de energia. Segundo Limbatchiya *et al.* (2012), a indústria do concreto, especialmente a do cimento Portland, é conhecida por ser um grande contribuinte para os danos ambientais e emissões de CO<sub>2</sub> e enfatiza que um projeto sustentável deve incluir a minimização do CO<sub>2</sub> global liberado e do consumo de energia necessário para produção do concreto e de seus vários componentes.

Em um estudo de caso realizado por Santos e Brito (2008), em um edifício em Portugal, através do uso de tabelas de referência de energia incorporadas por unidade de massa, foi possível calcular a quantidade de energia incorporada dos diversos materiais empregados na construção do empreendimento. Neste edifício, para o material concreto, a quantidade de energia incorporada obtida foi de 1.659.744 MJ, de um total de 5.630.036 MJ do empreendimento como um todo, o que equivale a cerca de 30% e que, caso este material não fosse reutilizado, seria necessário a utilização de grande quantidade de combustível fóssil para produção de matérias-primas e, conseqüentemente, seria liberado grande quantidade de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Além disso, deve ser considerado também a questão do transporte pois, caso não haja disponibilidade dos materiais constituintes do concreto próximos do local do empreendimento, é necessário ainda prever o gasto energético referente ao transporte dos mesmos.

No que se refere aos aspectos socioeconômicos, Limbatchiya *et al.* (2012) ressalta que os resíduos gerados pela demolição de antigas estruturas e atividades de construção é uma questão de preocupação em todo o mundo. Como a maioria dos países não possui planos de manejo e processamento desses materiais, eles são direcionados a aterros

sanitários, quando poderiam e deveriam ser reutilizados e reciclados em novas construções (SILVA *et al.*, 2014).

Segundo Hansen (1992), o número de locais acessíveis disponíveis no entorno dos grandes centros urbanos vem sofrendo decréscimo ao longo dos anos. Segundo o autor, no Japão a disposição de resíduos pode apresentar preços que variam de 3 a 10 dólares por tonelada. Além disso, há ainda a questão do aumento das distâncias entre os locais onde ocorre a demolição e as áreas de disposição, o que torna os custos de transporte mais caros. Com a crescente escassez de agregados naturais próximos aos centros, as distâncias entre os depósitos de recursos naturais e os locais das construções têm ficado maiores, o que impacta diretamente nos custos de transporte.

Além do encarecimento dos custos de transporte, deve-se considerar a questão da competitividade da economia proporcionado pela reciclagem de materiais da construção civil (EPA, 1998). No estudo de caso proposto por Santos e Brito (2008), citado anteriormente, com o emprego de materiais oriundos do processo de reciclagem na construção de um edifício em Portugal, foi obtida uma economia de cerca de 12%, com base em uma estimativa de custo de uma nova estrutura de concreto armado. Além disso, a reciclagem pode, eventualmente, reduzir os custos da proteção ambiental, pois permite gerar valor a partir de um produto que antes se constituía em despesa (VIRJLING, 1991 apud JOHN, 2000).

Um último ponto que deve ser levado em consideração é relativo aos impactos científicos e tecnológicos. Com o estudo da incorporação de materiais alternativos na produção de componentes no setor da construção civil é possível desenvolver materiais que alcancem um desempenho similar ou até superior em relação aos materiais convencionais em termos de propriedades mecânicas (ÇAKIR, 2014; MORETTI, 2014; LIMBACHIYA, MEDDAH, OUCHARGOUR, 2012; LEITE, 2001) e em termos de durabilidade (MEDINA *et al.*, 2016; KOULOURIS *et al.*, 2015; VÁZQUEZ *et al.*, 2014; TROIAN, 2010), o que vem ao encontro da crescente preocupação em relação à vida útil das construções.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a viabilidade técnica da incorporação do RCC como substituto parcial dos agregados graúdos naturais, em concretos expostos a ambientes agressivos.

Quanto aos objetivos específicos, são estes:

- Caracterizar o agregado graúdo obtido a partir do resíduo de construção civil (RCC) da região de Brasília;

- Avaliar as propriedades mecânicas e físicas dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado;
- Avaliar a penetração de íons cloreto nos concretos produzidos com agregado reciclado e comparar com o concreto produzido com agregado natural;
- Analisar a resistividade elétrica do concreto produzido com agregado reciclado e correlacioná-la com a penetração de íons cloreto;
- Identificar a relação existente entre a profundidade de carbonatação do concreto produzido com agregado reciclado e o concreto produzido com agregado natural;
- Verificar o efeito combinado da ação do CO<sub>2</sub> e dos íons cloreto nos concretos com agregado natural e reciclado.

### **1.3 Estruturação do trabalho**

No capítulo 2 serão discutidas as normas e legislações dos resíduos de construção civil existentes no Brasil, e um panorama geral dos resíduos sólidos, com foco na questão do RCC, no distrito de Brasília/DF.

No capítulo 3 serão abordadas as características dos agregados reciclados que influenciam diretamente na qualidade do concreto produzido com esse material. Aborda-se também as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado, tanto em relação ao comportamento mecânico, quanto aquelas que exercem influência na durabilidade.

No capítulo 4 será discutida a durabilidade do concreto produzido com agregado reciclado, sendo abordado o processo de transporte dos agentes agressivos no concreto. Além disso, será tratada a ação dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub>, bem como o impacto da ação combinada desses dois importantes agentes agressivos presentes no meio ambiente.

No capítulo 5 encontra-se descrito a metodologia adotada para os ensaios desta pesquisa, em três etapas: caracterização dos materiais empregados neste estudo, definição dos traços e propriedades analisadas.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, sendo estes correlacionados com os resultados apresentados na bibliografia existente sobre o assunto.

De posse destas informações, no capítulo 7 foi feita uma análise da aplicabilidade deste material no setor da construção civil quanto ao atendimento aos normativos vigentes quanto às propriedades mecânicas e parâmetros relacionados à durabilidade.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

## 2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC

### 2.1 Definição

O desenvolvimento econômico e o crescente processo de urbanização causaram graves danos ao meio ambiente e podem comprometer a sustentabilidade. Os números referentes à geração de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) revelam um total de 79,9 milhões de toneladas no país, sendo que, quanto às disposições finais, cerca de 42,6 milhões de toneladas desse material, ou seja, 58,7% do que é coletado, segue para aterros sanitários. Essa prática da disposição final inadequada de RSU ainda ocorre em todas as regiões e estados brasileiros, e 3.326 municípios fazem uso desses locais impróprios (ABRELPE, 2015).

A exploração de recursos, em particular recursos não renováveis, pelo setor da construção civil têm como consequência a geração de milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCC) a cada ano (SILVA *et al.*, 2014). Em países que não possuem planos de manejo e processamento desses materiais, eles são direcionados a aterros sanitários, quando poderiam e deveriam ser reutilizados e reciclados em novas construções (SILVA *et al.*, 2014). Em contraposição a isso, em países como no Reino Unido, Portugal, Espanha, Alemanha, Japão, China, Holanda, Bélgica e Dinamarca (BEHERA *et al.*, 2014) tem sido empregado o resíduo de construção civil na produção de concretos e, na maioria, já foram desenvolvidos normativos que abordam as especificidades desse material, como é o caso de Hong Kong (ETWB TCW No. 24/2004 ), Reino Unido (BS EN 206:2013) e Espanha (ANNEX 15 – *Recommendations for the utilization of recycled aggregate concrete (EHE -08)*).

Como exemplo de países que têm implementado políticas que incentivam o uso do material reciclado na produção de concretos, pode-se citar Hong Kong. O governo de Hong Kong proporcionou infraestrutura necessária para a reciclagem do material, além de desenvolver especificações que permitem o emprego de 100% de agregado graúdo reciclado em concretos não estruturais (resistência mecânica menor que 20 MPa) e 20% de agregado reciclado para concretos estruturais (POON; CHAN, 2007).

Por sua vez, a norma britânica BS EN 206:2013 também permite o emprego de 50% de agregado reciclado para ambientes internos e de até 30% em concreto para estruturas localizadas em ambientes de agressividade (KOULOURIS *et al.*; 2015). Há ainda o normativo da Espanha, ANNEX 15 – *Recommendations for the utilization of recycled*

*aggregate concrete (EHE -08)*, que permite o uso do agregado graúdo reciclado na proporção de até 20%, em massa, no concreto estrutural.

De acordo com Evangelista e Brito (2010), diversos projetos-piloto que empregam o RCC têm sido implementados, em diferentes países, obtendo resultados positivos que indicam a viabilidade do emprego desse material.

Segundo dados da Abrelpe (2015), foram gerados 45 milhões de toneladas de RCC no ano de 2015, o que resulta em 123.721 t/dia e 0,605 kg/hab.dia. Segundo a pesquisa realizada pelo Órgão, foi identificado um crescimento de 1,4% em relação ao ano anterior, sendo feito uma ressalva, posto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos.

Conforme panorama apresentado, constata-se que os resíduos da construção civil representam um significativo percentual (56%) dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas. De forma a permitir o avanço necessário nesse desafio, que consiste em implantar o manejo adequado dos resíduos sólidos, foi instituída a Lei nº 12.305/10, que promulga a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos ao propor um conjunto de instrumentos que propiciam o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos através do reaproveitamento destes, e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. Além disso, instituiu a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, criou metas visando a eliminação dos lixões e instituiu instrumentos de planejamento.

A NBR 15114:2004 define resíduos da construção civil como:

*Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.*

Nesta norma também se encontram classificados os resíduos da construção civil, de acordo com a sua origem e destinação: classe A, classe B, classe C e classe D. Nesta pesquisa serão empregados resíduos de construção civil classe A, ou seja, resíduos reutilizáveis de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, constituído predominantemente por materiais cerâmicos, argamassa e concreto.

## **2.2 Normas e Legislações**

Em vista da necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil e considerando a viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil, foi instituída a Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Há de se ressaltar também a relevância da Política Nacional de Resíduos Sólidos, sancionada pela Lei nº 12.035/10 que, através do estabelecimento de metas a serem cumpridas pelos Estados e municípios, propicia o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, onde se inclui o resíduo de construção civil. Foram criadas também algumas recomendações normativas relacionadas ao processamento e aplicação dos resíduos da construção civil, são elas:

- NBR 15112:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- NBR 15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- NBR 15114:2004: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
- NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

## **2.3 Geração de RCC**

Por muitos séculos, a indústria da construção tem sido uma grande consumidora de matérias-primas, sendo responsável por uma grande geração de resíduos. De acordo com dados publicados pela EUROSTAT, o Escritório de Estatísticas da Europa, 48% do resíduo produzido têm como origem o setor da construção e demolição, e cerca de 1/3 das matérias primas se transforma em resíduos. É válido ressaltar que esse cenário de geração de resíduos também pode ser considerado para outros continentes (VAZQUEZ, 2012).

O RCC tem, no mínimo, duas fontes de geração típicas: construção e demolição (ÂNGULO, 2005). Os principais constituintes dos resíduos gerados são: concreto, alvenaria e rocha.

Como tem sido demonstrado em pesquisas e estudos (HANSEN, 1992), os resíduos têm um grande potencial de reutilização no mesmo campo do qual eles têm origem e isto pode ser empregado para preservar as matérias primas existentes. Desde então a reciclagem dos resíduos de construção e demolição têm sido estimuladas pelo setor industrial, que produz agregados reciclados para construção (VAZQUEZ, 2012).

Nas últimas décadas tem ficado evidente que os resíduos de construção civil, se adequadamente processados, permitem a produção de agregados de qualidade, além do desenvolvimento de um importante mercado consumidor. No Brasil, a atividade reciclagem de resíduo de construção e demolição teve início na década de 80 (MIRANDA, 2016), sendo que a primeira usina de reciclagem foi instalada no ano de 1991, no município de São Paulo/SP (MIRANDA *et al.*, 2008). No Brasil, segundo Miranda *et al.* (2016), existem aproximadamente 105 usinas de reciclagem de RCC. Entretanto, os autores estimam que existam cerca de 310 usinas instaladas no país, que não se encontram listadas.

## **2.4 Reciclagem dos Resíduos de Construção Civil (RCC)**

De acordo com Behera *et al.* (2014), reciclagem é o ato de processar o material para que este seja empregado no desenvolvimento de novos produtos com valor agregado. Para o RCC, a técnica por trás do processo de reciclagem inclui o fracionamento do concreto demolido para produzir fragmentos de menor tamanho e perpassa por uma série de etapas, como a remoção de contaminantes (reforço, madeira, plástico, etc.), além de diferentes estágios de triagem e classificação.

Como exemplo de regulamentação no Brasil, o governo do Distrito Federal elaborou no ano de 2016 o Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, em consonância à crescente preocupação com a minimização dos danos decorrentes do grande volume de resíduos sólidos gerados, anualmente da ordem de 33.020 toneladas para a região Centro-Oeste (Ministério das Cidades, 2015), e em acordo com a legislação vigente.

De modo a regulamentar a utilização de agregados reciclados de RCC em obras e serviços de engenharia realizados no Distrito Federal, foi criado, em 2013, a CORC (Comitê Gestor do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Volumosos), que tem como atribuições a promoção de estudos, projetos e medidas relacionadas ao desenvolvimento de alternativas tecnológicas adequadas ao fomento da reciclagem, criação de um catálogo de custos de serviços com agregados reciclados de RCC e apresentação de ações para incentivar o consumo de agregados reciclados em obras públicas (ADASA, 2017).

No caso de Brasília/DF, o Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para RCC estabeleceu metas de 20 anos, classificadas em curto (01 a 04 anos), médio (05 a 09 anos) e longo prazo (10 a 20 anos), sendo elaborado conforme prerrogativas estabelecidas na Lei Federal nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) e na Lei Distrital nº 5.418/2014, qual estabelece princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos.

Para o Estado de São Paulo, onde as estatísticas indicam que a geração de resíduos da construção civil no município de São Paulo é de 5,85 milhões de toneladas anuais, ou seja, 18,8 mil toneladas/dia, números bem acima daqueles apresentados para o Distrito Federal, a Prefeitura de São Paulo elaborou e aprovou um conjunto de leis e decretos de forma a criar os meios necessários para se atingir o cenário desejável. Uma das medidas tomadas que contribuiu para o avanço nesta área, além de outros, é o Decreto Municipal nº 48.075 de 2006, considerado um grande avanço ao determinar a utilização de agregados reciclados, oriundos de RCC, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município, incentivando a reciclagem dos resíduos da construção civil (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014).

Nos dias atuais, com o advento das plantas de usinas de britadores móveis e a utilização de equipamentos portáteis, as instalações de reciclagem podem ser estabelecidas em locais para uso imediato do produto, além do frete ser reduzido (MEHTA; MERYMAN, 2009). A técnica de processamento úmido para RCC proporciona um agregado de melhor qualidade, com menos impurezas orgânicas e inorgânicas. Em alguns países desenvolvidos, como Japão, China, EUA e Países Baixos, os pesquisadores desenvolveram algumas técnicas de processamento avançadas para minimizar os efeitos adversos do RCC. Ao adotar esses métodos, agregados de alta qualidade podem ser produzidos removendo a argamassa aderente sem perder a integridade do agregado graúdo original. Nas Figura 1 e Figura 2 encontram-se ilustrados o processo de remoção da argamassa aderida ao agregado reciclado pelo processo de fricção e aquecimento.

Figura 1 – Remoção da argamassa aderida ao agregado reciclado pelo processo de fricção (NAWA, 2010)



Figura 2 - Remoção da argamassa aderida ao agregado reciclado pelo processo de aquecimento (Adaptado de NAWA, 2010)



Como exemplo de tratamento do agregado reciclado pode-se citar a triagem realizada através de RMN (ressonância magnética nuclear), que separa a maior parte das impurezas de baixa densidade (madeira, plástico e papel), sendo uma tecnologia implantada nas usinas de reciclagem da França (BUYLE-BODIN; ZAHARIEVA, 2002). Tam *et al.* (2007) também comprovou que o método de remoção da argamassa aderida ao agregado reciclado, através de métodos de tratamento de pré imersão em solução ácida, reduz a absorção de água do material e melhora as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado. Com a remoção do elo fraco do agregado reciclado, a restrição à sua aplicação também deixa de existir e torna viável o emprego deste material em aplicações mais amplas na construção civil.

No Brasil o emprego do RCC é regido pela ABNT NBR 15116:2004, que trata especificamente da utilização dos agregados reciclados em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural. A utilização em concretos estruturais depende ainda de estudos que viabilizem esta tecnologia e deverá ser tratada em normalização específica. Como exemplo de obras que empregaram o concreto com RCC pode-se citar 03 canteiros de obras do setor de edificações de Salvador/BA que empregaram o agregado reciclado na produção de graute para utilização nos pilaretes e concreto magro para regularização das vias de acesso (EVANGELISTA; COSTA; ZANTA, 2010); o emprego em diversos elementos de obras de edificações, realizados por Grigoli (2002), tais como: estrado sobre o solo para lançamento de contrapiso e passeio público, contrapiso de interiores de unidades habitacionais, concreto de piso para abrigos de automóveis leves, vigas e pilares de concreto com baixas solicitações, além de inúmeros empregos como material de preenchimento, em se tratando de argamassa produzido com agregado miúdo reciclado. No próximo capítulo serão abordadas as características do agregado reciclado (composição granulométrica, massa unitária e massa específica, absorção de água) e como estas podem influenciar as propriedades do concreto produzido com a incorporação de agregado reciclado.

## **3. USO DO MATERIAL RECICLADO COMO AGREGADO**

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica das características dos agregados reciclados que exercem influência sobre as propriedades do concreto produzido com a incorporação deste material na matriz cimentícia. Segundo Mehta e Monteiro (2014), dentre as características mais importantes a serem estudadas para a utilização de agregados em concretos estão a granulometria, a massa específica e a absorção de água. Quanto as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado, é fundamental analisar as propriedades mecânicas, os quais sejam: a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade, além da absorção de água, porosidade e resistividade elétrica.

### **3.1 Características dos agregados**

#### **3.1.1 Composição granulométrica**

De acordo com Neville e Brooks (2013), a composição granulométrica exerce uma influência importante na trabalhabilidade de um concreto resistente e econômico, com mínima segregação; no caso dos agregados reciclados, a distribuição granulométrica deve ser empregada como uma forma de orientar e prever a trabalhabilidade do concreto (LEVY, 2001).

Quanto à granulometria dos agregados reciclados, tanto os agregados miúdos quanto grãos tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura um pouco maior (BAZUCO; LIMA, 1999); granulometria contínua, o que releva um melhor arranjo entre as partículas e conduz a concretos mais trabalháveis (LEITE, 2001). Quanto à dimensão do agregado reciclado a ser empregado, é recomendado pela NBR 15116:2004 agregados com dimensão máxima característica de até 63 mm, para uso na pavimentação. Para concretos estruturais (TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996), é necessário atentar para a influência que partículas maiores exercem na resistência à compressão, posto que partículas de maiores dimensões tendem a apresentar argamassa aderida ao agregado reciclado e, portanto, maior a possibilidade de existência de uma ligação mais frágil e frações menores do material possivelmente apresentam maior quantidade de impurezas ou materiais que irão interferir negativamente no desempenho do concreto produzido.

Como fatores que influenciam a granulometria dos agregados pode-se citar o tipo de britador utilizado, que irá determinar uma maior existência de frações maiores ou menores do material, sendo que os britadores de mandíbula fornecem uma melhor distribuição de tamanho de partícula, os britadores de impacto produzem um agregado de maior qualidade porque fragmentam a argamassa aderida às partículas de agregado originais (CUR apud HANSEN, 1992).

Quanto ao emprego de agregado miúdo reciclado, muitos autores não recomendam o emprego deste na produção de concretos devido ao seu alto percentual de absorção de água, que chega a atingir 13,1 % (EVANGELISTA; BRITO, 2010), o que dificulta o controle da trabalhabilidade (POON; CHAN, 2007), cerca de 177% maior permeabilidade superficial do concreto produzido com agregado reciclado se comparado ao concreto convencional, o que pode interferir na durabilidade (ZAHARIEVA *et al.*; 2003), alto nível de contaminação por outros materiais, o que pode prejudicar o desempenho dos concretos produzidos (COLLINS, 1998).

Assim, quanto à granulometria é possível concluir que é necessário empregar um intervalo bem graduado do material, de forma a assegurar uma adequada compacidade do concreto e que apresente um custo competitivo, além de produzir um concreto que atenda às exigências dos normativos em termos de desempenho quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade. Quanto ao quesito custos, Leite (2001) ressalta que o emprego do agregado reciclado requer uma maior quantidade de pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, posto que esse material incorporado ao cimento, torna a mistura mais coesa e, conseqüentemente, com menor trabalhabilidade, o que aumenta o custo do concreto produzido.

### **3.1.2 Massa específica**

A determinação da massa específica do agregado é fundamental para realizar a dosagem dos concretos, sendo que esta propriedade influencia diversas propriedades do concreto tais como consistência, coesão, resistência à compressão e resistência à abrasão.

Alguns fatores influenciam na massa específica dos agregados reciclados. Os resíduos provenientes da construção e demolição são compostos de materiais porosos (CABRAL, 2007), e a idade da fonte que deu origem ao agregado reciclado exerce influência nos resultados, estando relacionado a avançado processo de hidratação do cimento (KUMAR; DHINAKARAN, 2012).

Os agregados reciclados de RCC apresentam valores de massa específica inferiores aos agregados naturais. A Tabela 1 apresenta os valores de massa específica para os agregados reciclados obtidos na bibliografia:

Tabela 1 – Massa específica de agregados reciclados, segundo autores (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		Variação
	Agregado Reciclado	Agregado Natural	
Berndt (2009)	2,65 <sup>(1)</sup>		1,5%
	2,59 <sup>(1)</sup>	2,69	3,7%
	2,61 <sup>(1)</sup>		3,0%
Rao, Bhattacharyya, Barai (2011)	2,51	2,75	8,7%
Kumar, Dhinakaran (2012)	2,63 a 2,68	2,73	3,7%
			1,8%
Thomas et al (2013)	2,32	2,54	8,7%

<sup>(1)</sup> Massa específica para a fração 6,35-12,7mm

<sup>(2)</sup> Massa específica para a fração 12,7-19,0mm

<sup>(3)</sup> Massa específica para a fração 19,0-25,4mm

Segundo os valores apresentados na tabela, observa-se uma redução entre 1,5% a 8,7% da massa específica dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais. Moretti (2014) ressalta que os resultados de massa específica encontrados na bibliografia são bastante variáveis, fato que pode ser atribuído à variabilidade na composição e distribuição granulométrica dos agregados reciclados. Segundo Leite (2001), essa variabilidade dos resultados de massa específica do agregado reciclado pode ser atribuída não só aos aspectos relacionados ao material em análise, como composição e tipo de beneficiamento realizado.

### 3.1.3 Absorção de água

A absorção de água dos agregados reciclados é maior do que a absorção dos agregados naturais, devido a alguns fatores: à presença de argamassa aderida às partículas do material (BAIRAGI, 1993; PADOVAN, 2013); à existência de poros resultantes de fissuras e dos poros capilares na argamassa de cimento aderida ao material, que determinam a taxa de absorção e permitem que o agregado absorva mais água do que o agregado natural (CUI *et al.*, 2015); ao valor médio de absorção de água das partículas que compõem o material e da porosidade dessas partículas (HEWLETT, 1998) e a idade da estrutura que deu origem aos agregados reciclados, posto que há um aumento da absorção de água com o aumento da idade da estrutura (TAM *et al.*, 2008) e qualidade do agregado reciclado (ABDULLAH, 2014).

Na Tabela 2 encontra-se identificado alguns percentuais de absorção de água dos agregados encontrados na literatura.

Tabela 2 – Percentual de absorção de água do agregado reciclado e agregado natural apresentado em diversas pesquisas (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Absorção agregado reciclado (%)	Absorção do agregado natural (%)
Byule-Bodin e Zaharieva (2002)	6,0	0,2
Tam et al. (2008) <sup>(1)</sup>	1,99 – 2,67 4,42 – 5,92 7,24 - 8,72	0,49 – 0,78
Berndt (2009)	5,9 (#6,35-#12,7 mm) 4,7 (#12,7-#19,0 mm) 4,1 (#19,0-#25,4 mm)	0,6
Zega e Maio (2011)	5,8	0,2
Kumar e Dhinakaran (2012)	4,8	3,0
Tenorio <i>et al.</i> (2012)	8,41 5,37	0,49
Thomas et al. (2013)	5,3	1,6
Abdulla (2014)	5,4 - 14,3	5,7

<sup>(1)</sup> De acordo com a origem e idade da estrutura que deu origem ao agregado reciclado. O agregado reciclado foi obtido a partir de 3 diferentes origens, com diferentes idades: agregados reciclados oriundos de uma usina de reciclagem localizada em LungMun (Hong Kong), agregados reciclados oriundos de processo de demolição em Victoria Harbour (Hong Kong), agregado reciclado produzido a partir da demolição de edificações e shopping center, com idade de 35 anos, respectivamente. O agregado natural utilizado possui 10 mm de diâmetro.

<sup>(2)</sup> Nos estudos de Tenório et al. (2012) foram empregados agregados reciclados oriundos de demolição, o que seria constituído por diversos materiais tais como concreto e cerâmica e agregados reciclados de concreto.

Na Tabela 3 encontram-se identificados a porosidade dos agregados reciclados e naturais identificados na literatura.

Tabela 3 – Porosidade dos agregados reciclados e agregado natural apresentada nas pesquisas (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Normativo	Porosidade agregado reciclado (%)	Porosidade do agregado natural (%)
Byule-Bodin e Zaharieva (2002) <sup>(1)</sup>	LMDC	12,50	0,3
Tam et al. (2008) <sup>(2)</sup>	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP)	13,94 – 20,41	-
Thomas et al. (2013)	EM 12390-7 (Parte 7)	12,30	4,0
Abdulla (2014) <sup>(3)</sup>	ASTM C29	14,02 13,40	3,9

<sup>(1)</sup> Byule-Bodin e Zaharieva (2002) Para obter a porosidade dos agregados foi empregado um método desenvolvido na França por Thénoz e modificado no Laboratório de Materiais e Durabilidade das Construções (LMDC)

<sup>(2)</sup> Tam *et al.* (2008) empregou 10 amostras de agregado reciclado, de diferentes localizadas, em Hong Kong. O normativo para identificar a porosidade do agregado pode ser encontrado no Manual de Micro Poros 9320

<sup>(3)</sup> Abdullah empregou agregados reciclados de concreto e cerâmicos em seus estudos

A alta absorção de água do agregado reciclado influencia em diversos parâmetros do concreto, tais como redução da resistência à compressão do concreto produzido com agregados reciclados (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011; KUMAR; DHINAKARAN, 2012); nas propriedades físicas e mecânicas do novo concreto produzido, com destaque para a

perda de trabalhabilidade (PADOVAN, 2013); na durabilidade do concreto, devido ao aumento da porosidade da matriz cimentícia (MORETTI, 2014).

Para Tam *et al.* (2008), quando o percentual de absorção de água do agregado não apresenta grandes variações entre as partículas do material, este parâmetro não representa um problema na confecção de concretos, contanto que esse percentual tenha sido determinado e, deste modo, possa ser levado em consideração na etapa de dosagem e mistura dos concretos.

### **3.2 Propriedades do concreto produzido com agregado reciclado**

Neste item serão explanadas as principais propriedades do concreto com RCC, como trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água e resistividade elétrica.

#### **3.2.1 Trabalhabilidade**

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

A trabalhabilidade do concreto fresco tem efeito direto sobre a capacidade de bombeamento e a construtibilidade porque determina a facilidade com que uma mistura de concreto pode ser manipulada sem que ocorra segregação (MEHTA; MONTEIRO, 2014), sendo que a trabalhabilidade ideal seria aquela obtida através de um adensamento “teoricamente” total (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O emprego do agregado reciclado afeta negativamente a trabalhabilidade. Dentre os fatores que influenciam a perda da trabalhabilidade, pode-se citar a maior quantidade de vazios no concreto, devido à maior porosidade do agregado reciclado; o maior tempo de mistura e o aumento do percentual de substituição do agregado reciclado (BAIRAGI *et al.*, 1993); a não execução do procedimento de pré molhagem do agregado reciclado antes de efetuar a mistura (FONG; JAIME, 2002; DIMITROU *et al.*, 2018); elevado percentual de absorção do agregado reciclado (FERREIRA *et al.*, 2011); aumento da área superficial e da microestrutura dos poros dos agregados reciclados de origem cerâmica, resultando numa zona de transição mais fraca e menos coesiva (ABDULLA, 2014); baixa qualidade do agregado reciclado, composto de inúmeros materiais inclusive impurezas, maior a perda de trabalhabilidade (DIMITROU *et al.*, 2017).

De acordo com Hansen (1992), a saturação dos agregados de concreto reciclado com a água da mistura ocorre em aproximadamente 15 minutos, sendo este procedimento primordial para que não ocorra rápida perda da trabalhabilidade do concreto fresco.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), uma mistura de concreto sem a adequada trabalhabilidade não só aumentará o custo de manipulação, mas também apresentará baixa resistência e durabilidade. Desta forma, de modo a minimizar essa perda de trabalhabilidade, pode ser adotado tanto o método de pré-saturação quanto o método de compensação de água da mistura nos concretos quando da utilização do agregado graúdo reciclado (FERREIRA *et al.*, 2011).

Uma inadequada trabalhabilidade pode causar exsudação do concreto, fenômeno que faz com que a relação *a/c* da superfície fique alta e reduza a resistência mecânica; dificuldade de concretagem e, conseqüentemente, relacionada com os processos de lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Além disso, está relacionada com a menor ou maior aptidão do concreto ser empregado sem perda de homogeneidade.

Por fim, vale ressaltar a importância da necessidade de um maior consumo de água na produção de concreto com utilização de agregado, se comparado com o produzido com agregados naturais. O concreto produzido com agregados graúdos reciclados e areia natural requer aproximadamente 10 l/m<sup>3</sup> ou 5% de adicional de água, para atingir a mesma trabalhabilidade, sendo necessário ressaltar que esses valores podem sofrer variações, conforme a composição do material. Estes valores são válidos para agregados reciclados provenientes de alvenaria, que são mais absorventes que os agregados provenientes de resíduos de concreto (LEVY, 2001).

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados de trabalhabilidade de concreto produzido com agregados reciclados e dos concretos produzidos com agregados naturais, identificados na bibliografia existente.

Tabela 4 – Trabalhabilidade obtida para o concreto produzido com agregado reciclado e agregados naturais de diversas pesquisas (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Agregado reciclado	Abatimento do tronco de cone (mm)
Bairagi et al. (1993)	0%	35
	25%	30
	50%	25
	75%	20
	100%	20
Fong, Yeung e Poon (2002) <sup>(1)</sup>	0%	Fixo em 75 mm
	20%	
Buyle-Bodin e Zaharieva (2002)	0%	65

Tabela 4 – Trabalhabilidade obtida para o concreto produzido com agregado reciclado e agregados naturais de diversas pesquisas (Fonte: Próprio Autor) *continuação*

Autor	Agregado reciclado	Abatimento do tronco de cone (mm)
	100%	50
Berndt (2009)	0%	75
	100%	65
Zega (2011)	0%	70
	25%	50
	50%	30
	75%	25
Limbachiya et al. (2012) <sup>(2)</sup>	0%	70
	30%	70
	50%	60
	100%	40
Liang (2015)	100%	125
Dimitrou <i>et al.</i> (2018) <sup>(3)</sup>	0%	200
	100% - sem pré-molhagem	170
	100% - com pré-molhagem	190

<sup>(1)</sup> Uso de aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade fixa em 75 mm

<sup>(2)</sup> Concretos estruturais classe resistência C20

<sup>(3)</sup> O processo de mistura do concreto com agregado reciclado foi composto de 2 etapas: a primeira etapa o agregado reciclado foi misturado com parte da água e, na segunda etapa, foram misturados os demais componentes. Esse procedimento caracteriza pré molhagem do agregado reciclado.

Faz-se necessário mencionar a questão do efeito do aditivo superplastificante no concreto, que está relacionado à trabalhabilidade. A principal ação dos superplastificantes é através das longas moléculas que atribui uma carga negativa às partículas de cimento, que se repelem entre si. Taylor (1990) menciona que essa adsorção dos grãos de cimento hidratado na mistura é realizada através da redução da floculação. Esse processo resulta em aumento da trabalhabilidade e pode ser explorado de duas maneiras: produzindo concreto de alta trabalhabilidade ou concreto de alta resistência (NEVILLE, 2011).

A eficácia dos superplastificantes quanto à prevenção da reaglomeração das partículas de cimento permanece enquanto há suficientes moléculas de superplastificante disponíveis para cobrir a superfície das partículas de cimento. Isso permite que a hidratação de todas as partículas do cimento. Tanto a presença como dos produtos isolados da hidratação e a hidratação adicional ocasionam o efeito de reduzir a trabalhabilidade da mistura. É válido ressaltar que os superplastificantes não modificam a estrutura da pasta de cimento hidratada, sendo que seu efeito pode ser atribuído à melhor distribuição das partículas de cimento e, conseqüentemente, melhor hidratação (NEVILLE, 2011).

Quanto ao efeito dos aditivos superplastificantes no concreto com agregado reciclado, vários estudos (PEREIRA *et al.*, 2012; MATIAS *et al.*, 2013; GARCIA-GONZÁLEZ, 2016;

BRAVO *et al.*, 2017) foram desenvolvidos, de modo a identificar o efeito deste componente no concreto. Foi identificada uma tendência de redução do efeito do aditivo superplastificante no concreto com agregado reciclado, em relação ao concreto convencional, sendo que os fatores que contribuem para essa redução da eficácia do produto estariam relacionados à qualidade do agregado reciclado, ou seja, materiais cerâmicos, que seriam mais porosos, apresentariam uma maior redução no desempenho (PEREIRA *et al.*, 2012); ao aumento da superfície específica deste material, que apresentasse mais áspero (BRAVO *et al.*, 2017); ao aumento do percentual de substituição do agregado reciclado (MATIAS *et al.*, 2013; BRAVO *et al.*, 2017).

### **3.2.2 Resistência à compressão**

De modo geral, os concretos produzidos com agregado reciclado apresentam menores valores de resistência do que os concretos produzidos com agregados naturais. A incorporação do agregado reciclado no concreto resultou em uma redução média de 21% a 27% na resistência à compressão (ABDULLA, 2014); reduções similares (15% a 30%) foram obtidas para concretos com 100% de substituição (KATZ, 2003; CHISHOLM, 2011); valores de resistência apresentaram variações de 2%, 6%, 10% e 16%, para concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado reciclado, respectivamente (BAIRAGI *et al.*, 1993).

Niro *et al.* (1998) concluiu em seus estudos que não é possível produzir concreto com agregado reciclado mais resistente do que 35 MPa, mesmo empregando menor relação a/c (0,35). No entanto, no estudo desenvolvido por Thomas *et al.* (2013) foram obtidos valores de resistência à compressão de 55 MPa para concretos em que foi substituído 20% do agregado natural, pelo reciclado de concreto, aos 28 dias, sendo que em idades mais avançadas, foi obtido o valor de 65 MPa (180 dias) e 68 MPa (365 dias). Tais variações podem ser atribuídas ao procedimento de mistura, à origem e tipo de agregado reciclado empregado.

Vários fatores podem reduzir a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, tais como: aumento do percentual de substituição do agregado reciclado (BAIRAGI *et al.*, 1993); maior porosidade dos agregados reciclados (ÂNGULO, 2005); menor consumo de cimento (ÂNGULO, 2005; BERNDT, 2009); presença de impurezas, (KUMAR; DHINAKARAN, 2012); alteração nos procedimentos de mistura; origem do agregado reciclado (THOMAS *et al.*, 2013) e redução da massa específica do concreto (ABDULLA, 2015).

De acordo com Ângulo (2005), a resistência a compressão pode reduzir até 40% se comparado com o concreto produzido com agregados naturais, devido à influência da porosidade dos agregados graúdos reciclados. O mesmo autor identificou um incremento da resistência à compressão para concretos com maior consumo de cimento, sendo que para agregados menos densos (massa específica menor do que  $2,2 \text{ g/cm}^3$ ) esse aumento pode variar de 76% a 150%, não sendo vantajoso o uso desses agregados menos densos em concretos estruturais convencionais. Na Tabela 9 estão apresentados os valores de resistência à compressão obtidos em diversas pesquisas existentes.

A literatura existente aponta que concretos produzidos com até 30% de substituição de agregado reciclado não apresenta efeitos significativos na resistência à compressão do concreto (SILVA *et al.*, 1998; THOMAS *et al.*, 2013). Silva *et al.* (1998) somente ressalta que para maiores percentuais de incorporação do agregado reciclado, pequenas alterações nas proporções de mistura podem ser necessárias para assegurar que o desempenho equivalente do concreto seja alcançado.

De modo a aprimorar a resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado, uma alternativa é o emprego de aditivos superplastificantes, que reduzem a relação a/c e conseqüentemente pode ocorrer um aumento na resistência à compressão. Em um estudo realizado por Khaldoun (2007) em que foram avaliadas as propriedades mecânicas do concreto produzido com agregado reciclado e adição de superplastificante, foram obtidos valores de resistência à compressão de aproximadamente 90% do concreto convencional (produzido com agregado natural). Além disso, pode-se aumentar o consumo de cimento, mas, no entanto, há de se verificar a viabilidade econômica dessa solução, uma vez que o cimento é o insumo de maior custo na produção do concreto.

### **3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral**

Há uma tendência de se considerar a resistência à tração como uma característica secundária do concreto, mas, em se tratando de novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada (LEITE, 2001).

A resistência à tração por compressão diametral do concreto produzido com agregado reciclado normalmente apresenta-se menor do que aquela obtida para os concretos convencionais. Nas pesquisas desenvolvidas foram obtidos valores de resistência à tração por compressão diametral variando de 9% a 27% menores para o concreto produzido com agregado reciclado, se comparado ao concreto com agregado natural (MORETTI, 2014; RAHAL, 2007; NOGUEIRA, 2015). Na Tabela 5 estão identificados os valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral obtida da literatura.

Tabela 5 – Resistência à tração por compressão diametral obtida para o concreto produzido com agregado reciclado e agregados naturais de diversas pesquisas (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Agregado reciclado	Resistência à tração por Compressão diametral (MPa)
Katz (2003)	0%	3,3
	100% -britagem concreto com 1 dia	3,4
	100% - britagem concreto com 3 dias	2,9
	100% - britagem concreto com 28 dias	3,1
Rahal (2007)	0%	2,85
	100%	2,58
Moretti (2014)	0%	3,3
	30%	3,1
	50%	2,4
	100%	2,6
Nogueira (2015) <sup>(1)</sup>	0%	2,64
	50% - adicionado no início da mistura	2,39
	50% - adicionado ao final da mistura	2,72

<sup>(1)</sup> Não realizou a pré molhagem dos agregados reciclados e nem a compensação de água devido ao elevado absorção de água do agregado reciclado.

Dentre os fatores que exercem influência na resistência à tração por compressão diametral pode-se citar a relação a/c (LEITE, 2001), massa específica do concreto produzido com agregado reciclado, obtendo-se um aumento de 20% a 30% na resistência à tração por compressão diametral para um aumento de 10% na massa específica (ABDULLA, 2014) e a ordem de inserção do agregado reciclado na mistura, sendo que a introdução do agregado no início da mistura faz com que ocorra uma absorção direta da água de amassamento, reduzindo a relação a/c da mistura e, com isso, apresentando uma maior resistência (NOGUEIRA, 2015).

### 3.2.4 Módulo de elasticidade

A importância do módulo de elasticidade do concreto está relacionada com a deformação, fluência e fadiga do concreto, que ocasionam a formação de flechas, ocasionando fissuras e perda da protensão, no caso do concreto protendido, podendo levar até a ruptura. Na NBR 6118:2014 estão representados inclusive diagramas de tensão-deformação, que relacionam a deformação com o atingimento do Estado-limite último (ELU), relacionado ao colapso da estrutura. É válido ressaltar que a formação de fissuras e deformações excessivas não só afetam a durabilidade, como também estão relacionadas com o conforto do usuário e a estética.

Deformações excessivas comprometem a estabilidade das peças, podem colocar em risco seus usuários ou gerar desconforto indesejável em função dessas deformações. Além

disso, a deformação exagerada afeta todos os sistemas e subsistemas solidarizados a ela: vedações e instalações, que podem ser muito prejudicados (DEMARCHI, 2011).

Quanto ao módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado reciclados há uma tendência de que ocorra uma redução, se comparado com o concreto convencional. Estão identificados na Tabela 9 alguns resultados de módulo de elasticidade identificados na bibliografia existente.

Dentre os fatores que influenciam o módulo de elasticidade nos concretos produzidos com agregados reciclados pode-se citar a aderência entre o agregado e a matriz cimentícia, devido à grande quantidade de argamassa antiga aderida aos agregados reciclados, que apresenta menor módulo de elasticidade do que a matriz cimentícia formada (HANSEN, 1992); ao teor de substituição do agregado reciclado, pois maiores teores de substituição apresentam alta porosidade, ocasionando um aumento da quantidade de agregados porosos na misturas de concreto, o que reduz o módulo de elasticidade deste material (LEITE, 2001; THOMAS *et al.*, 2013); porosidade do agregado (ÂNGULO, 2005); o tipo do agregado, sendo identificada uma piora desta propriedade no concreto produzido com agregados de origem cerâmica, em detrimento de agregados reciclados de concreto (CABRAL, 2007) e inversamente relacionado com a relação a/c da mistura (THOMAS *et al.*, 2013).

Hansen e Boegh (1992) identificaram que o módulo de elasticidade de um concreto produzido com agregado reciclado que apresentou grande quantidade de argamassa aderida, de baixa qualidade, apresentou uma redução de 45%, se comparado com o concreto convencional.

Conforme pesquisa desenvolvida por Cabral *et al.* (2007) foi identificada uma redução de cerca de 44% nos concretos com substituição de 100% de agregado graúdo de cerâmica vermelha e de 23% pra concretos com substituição total por agregado graúdo de concreto.

De acordo com Ângulo (2005), quanto maior a massa específica do agregado reciclado, menos poroso seria o material, ou seja, este agregado seria de melhor qualidade e, portanto, maior o módulo de elasticidade. Conforme esperado, o autor identificou variações no módulo de elasticidade entre os concretos produzidos com agregado reciclado de massa específica maior do que  $2,2 \text{ g/cm}^3$  e no concreto produzido com agregado reciclado com valor de massa específica inferior a  $2,2 \text{ g/cm}^3$ .

### **3.2.5 Absorção de água e porosidade**

A absorção de água dos concretos com incorporação de agregado reciclado na matriz cimentícia geralmente apresenta um percentual de absorção de água maior do que aqueles

apresentados pelo concreto convencional, produzido com agregados naturais. A absorção de água dos agregados reciclados foi 10%, 18% e 33% maior, se comparado com a absorção do concreto convencional (5,5%), para os traços com substituição de 20%, 50% e 100%, respectivamente (THOMAS *et al.*, 2013); percentuais de aumento de absorção de água de até 151% foram obtidos para os concretos produzidos com agregados reciclados composto por diversos materiais, em comparação com o concreto com agregados naturais (5,7%) (ABDULLA, 2015).

Dentre os fatores que influenciam esta propriedade pode-se citar o processo de mistura, onde pode-se citar o procedimento de pré molhagem dos agregados reciclados, que melhora o desempenho dos concretos (MOREIRA, 2003); a porosidade, que está relacionada com a massa específica aparente e volume de vazios dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclado (ÂNGULO, 2005); composição do material, pois determinados materiais seria mais porosos, com destaque para a cerâmica vermelha (ÂNGULO, 2005); os efeitos da antiga argamassa aderida ao agregado reciclado, que aumenta a porosidade (KUMAR; DHINAKARAN, 2012; ABDULLA, 2015); relação a/c, sendo um fator diretamente relacionado com a influência na absorção de água do concreto (THOMAS *et al.*, 2013) e a qualidade do agregado (ABDULLA, 2015).

Ângulo (2005) identificou que os agregados que apresentam massa específica menor do que  $2,2\text{g/cm}^3$  apresentaram valores de absorção de água elevados, podendo necessitar de controle nas condições de aplicação, posto que a durabilidade dos concretos é um requisito importante.

Como a absorção de água dos concretos pode impactar na durabilidade do concreto, posto que um dos mecanismos que propiciam a corrosão das armaduras é a presença de água, podem ser adotadas algumas alternativas para minimizar essa absorção dos concretos produzidos com agregado reciclado, onde pode-se citar: pré umidificar os agregados reciclados previamente à mistura, analisar os materiais que compõem o agregado reciclado e, fazer uso de aditivos superplastificantes no concreto, que reduzem a relação a/c.

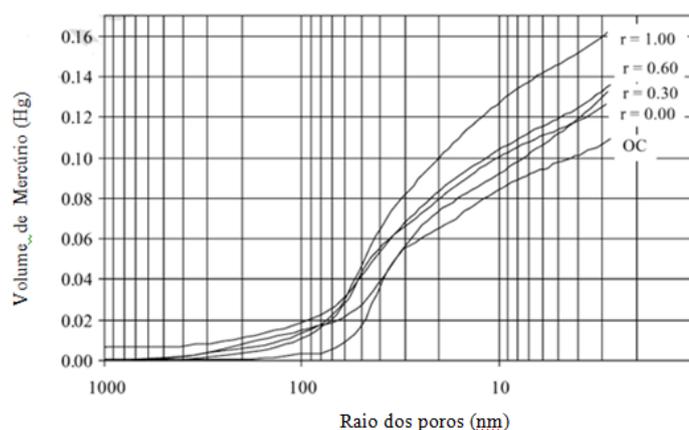
No que se refere à porosidade do concreto com incorporação de agregado reciclado, Levy (2011) menciona que, a porosidade total do concreto com RCC será sempre maior do que a do concreto com agregado natural, para uma mesma relação a/c efetiva. A porosidade dos concretos produzidos com agregado reciclado obtidos foram de 14%, 15% e 147%, para os teores de 20%, 50% e 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado, enquanto a porosidade do concreto convencional obtida foi 12% (THOMAS *et al.*, 2002);

índice de vazios de 14,2 g/cm<sup>2</sup>, 15,7 2 g/cm<sup>2</sup> e 18,2 g/cm<sup>2</sup>, para percentuais de substituição de 0%, 50% e 100% de RCC (SILVA, 2017).

Dentre os fatores que influenciam na porosidade do concreto produzido com agregado reciclado pode-se citar o teor de substituição, que está relacionado com o aumento dos poros capilares (GÓMES-SOBERÓN, 2002; SILVA, 2017) e relação a/c, sendo um fator diretamente relacionado com a porosidade (SILVA, 2017).

Gómes-Soberón (2002) afirma que o concreto com agregado reciclado será mais poroso do que o concreto convencional uma vez que os agregados de RCC geralmente são mais porosos do que os agregados naturais. Essa afirmação é embasada através dos resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizado pelo autor no qual, através de uma correlação do volume de mercúrio (m<sup>3</sup>) com a pressão exercida (MPa) é possível depreender o tamanho dos poros do concreto. Na Figura 3 está ilustrada a relação existente entre o raio dos poros versus o percentual de substituição do agregado natural pelo reciclado (r), onde r = 0,00 seria o concreto referência (somente agregados naturais), e r =1,00 seria o concreto em que foi realizado a substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado.

Figura 3 – Volume de mercúrio x tamanho dos poros do concreto, em função de teores crescentes de substituição de agregado natural por agregado reciclado (Fonte: GÓMES; SOBERÓN, 2002)



A porosidade é um aspecto relevante quando se considera a durabilidade do concreto. Segundo estudos desenvolvidos por Kou e Poon (2012), os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram-se mais porosos e isso pode interferir diretamente na penetração de íons cloreto e de CO<sub>2</sub> no concreto.

### 3.2.6 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto, que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. A resistividade pode ser definida pela relação entre tensão aplicada e corrente resultante, sendo uma propriedade específica

do material. A determinação da resistividade é obtida pela resistência multiplicada por um fator de conversão, que depende das dimensões do corpo de prova utilizado.

Um meio mais poroso influencia na possibilidade de permitir a atuação de agentes danosos à estrutura e também reflete diretamente na característica de resistividade do concreto (GONÇALVES; ROSA; OLIVEIRA, 2014). Entende-se que quanto mais poroso um concreto, menor será sua resistividade elétrica e conseqüentemente maior a possibilidade de ocorrer a corrosão (AZZI; MORAES, 2017).

O sistema de poros do material está relacionado à permeabilidade dos fluidos e difusividade de íons, sendo que a corrente elétrica é transportada por íons dissolvidos nos poros (BEUSHAUSEN, 2015), o que pode ser associado ao efeito dos íons cloreto, estando intimamente relacionada à velocidade de corrosão das armaduras (SANTOS, 2006).

A resistividade elétrica é um método que tem sido bastante empregado. A principal vantagem é a celeridade do ensaio. Além disso, no caso da resistividade elétrica superficial, trata-se de um ensaio não destrutivo, que pode ser realizado em estruturas existentes, sem a necessidade de extração de testemunhos de concreto, fornecendo resultados que podem ser úteis na avaliação da corrosão das armaduras. Na Tabela 6 encontra-se identificada a relação entre a resistividade elétrica e o risco de corrosão das armaduras, conforme proposto pelo normativo FIB CEB-192 e o boletim europeu COST 509.

Tabela 6 – Valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo a CEB-192 e o boletim europeu COST 509 (Fonte: Ribeiro *et al.*, 2014)

Resistividade (kΩ.cm)		Risco de Corrosão
CEB-192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
-	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	-	Muito Alto

Na Tabela 7 encontra-se identificada a relação entre a resistividade elétrica uniaxial ou direta e a penetração de íons cloreto, conforme proposto pela AASHTO TP 119-15.

Tabela 7 – Classificação quanto à penetração de íons cloreto (Fonte: AASHTO TP 119-15)

Classificação quanto à penetração de íons cloreto	Resistividade uniaxial (kΩ.cm)
Alta	< 5,2
Moderada	5,2 – 10,4
Baixa	10,4 – 20,8
Muito Baixa	20,8 – 207
Insignificante	> 207

O concreto seco, em temperatura ambiente, apresenta uma resistividade da ordem de  $10^4$ ohm.m, enquanto o concreto seco em estufa apresenta uma resistividade da ordem de  $10^9$ ohm.m (NEVILLE, 2011). Este aumento na resistividade do concreto ocorre devido à remoção da água, que atua como meio eletrólito na condução da corrente elétrica.

Diversos fatores influenciam a resistividade elétrica do concreto, e podem estar relacionadas às características do concreto (relação a/c, tipo e quantidade de agregados, consumo de cimento, presença de adições minerais e aditivos químicos, grau de hidratação do cimento), características ambientais (temperatura, umidade relativa) e devido à ação de agentes agressivos (íons cloreto,  $CO_2$ , entre outros) (SANTOS, 2006). De acordo com Spragg *et al.* (2012), a resistividade elétrica pode ser estimada pela (Equação 1:

$$\rho = \rho_0 \cdot F \cdot \frac{1}{f(S)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Sendo:  $\rho$  = resistividade elétrica;  $\rho_0$  = resistividade da fase fluida; F = fator resultante do produto do volume de poros e coeficiente de tortuosidade e  $f(S)$  = função que descreve o nível de saturação, sendo geralmente 1, considerando o corpo de prova saturado.

Na Tabela 8 estão identificados os valores de resistividade elétrica obtidos para concretos produzidos com agregado reciclado.

Tabela 8 – Valores de resistividade elétrica de concretos produzidos com agregado reciclado

Autor	Agregado reciclado	Resistividade elétrica do concreto (k $\Omega$ .cm)		
		28 dias	63 dias	91 dias
Nogueira (2015) <sup>(1)</sup>	0%	22,8	26,8	-
	50% - adicionado no início da mistura	21,4	26,3	
	50% - adicionado ao final da mistura	21,6	27,3	
Medina <i>et al.</i> (2016) <sup>(2)</sup>	0%	3,9	4,4	-
	20%	4,6	5,0	
	25%	5,1	5,3	
Singh e Singh (2016) (Resistividade volumétrica)	0%	11,8	-	-
	25%	10,0		
	50%	7,8		
	75%	7,3		
	100%	6,0		
Silva (2017) <sup>(3)</sup>	0%	10,0	9,0	8,0
	50%	11,0	10,5	9,0
	100%	12,0	11,0	9,0

<sup>(1)</sup> Nogueira (2015) empregou dois métodos de mistura para o concreto produzido com agregado reciclado: inserção do agregado no início da mistura, caracterizando uma pré molhagem; e um segundo método de mistura, adicionando o agregado reciclado ao final da mistura, após todos os demais materiais terem sido adicionados. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, sendo a cura realizada em ambiente com 100% umidade;

<sup>(2)</sup> A maior resistividade do concreto produzido com o resíduo de agregado cerâmico reciclado pode ser atribuído à composição deste resíduo industrial (composto principalmente por quartzo) e cuja resistividade do agregado é da ordem de  $10^{13}\Omega$ .m, enquanto o agregado natural apresenta resistividade de  $3,8 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^{12}$

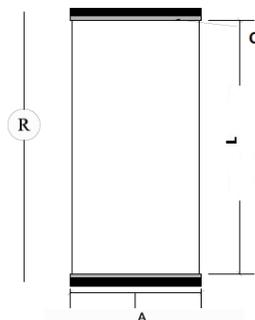
<sup>(3)</sup> Silva (2017) manteve os corpos de prova em câmara úmida por 180 dias e, posteriormente, as amostras de concreto com agregado reciclado foram submetidas a ensaio de ciclos de molhagem (2 dias) e secagem (em estufa, a 50° C, por 5 dias) em solução de NaCl a 3%

Existem diversas técnicas para se determinar a resistividade elétrica do concreto. Dentre estas técnicas podem ser citadas o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, também denominada 2 eletrodos ou teste da resistividade direta, regido pela norma brasileira NBR 9204:2012 e pela norma americana AASHTO TP 119-15 e o ensaio de resistividade elétrica superficial, também conhecido como ensaio dos 4 eletrodos (sonda Wenner), preconizado na norma ASTM G57-06. Estes ensaios são apresentados a seguir. É válido ressaltar que, apesar de existir um normativo brasileiro (NBR 9204:2012) para a determinação da resistividade elétrica volumétrica, este não é muito utilizada devido à dificuldade para a montagem da célula de ensaio com a utilização de mercúrio como eletrodo (SILVA, 2017).

### 3.2.6.1 Resistividade elétrica volumétrica

A resistividade direta de uma corrente contínua pode ser determinada através da aplicação de uma tensão entre dois eletrodos com o corpo de prova de concreto situado entre estes. Na Figura 4 encontra-se esquema ilustrativo do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.

Figura 4 – Ensaio de resistividade volumétrica (Fonte: Adaptado de AASHTO TP 119-15)



Sendo que  $A$  representa a área da seção transversal ( $m^2$ ) do corpo de prova de concreto,  $L$  o comprimento do corpo de prova;  $C$  o meio condutivo. O meio condutivo é necessário à medida que assegura o adequado contato entre a amostra de concreto e os eletrodos sendo que, conforme instruído pela norma AASHTO TP 119-15, pode ser empregado papel filtro embebidos em solução de cal saturada. A resistividade volumétrica superficial ( $R$ ) é então obtida através da aplicação de uma diferença de potencial entre o topo e a base do corpo de prova. O cálculo da resistividade elétrica do dispositivo condutor ( $R_{cilindro}$ ) é obtido pela Lei de Ohm (Equação 2):

$$R_{cilindro} = \frac{V}{i} \quad (\text{Equação 2})$$

em que  $R_{cilindro}$  representa a resistividade elétrica do dispositivo condutor,  $V$  é a diferença de potencial aplicada e  $i$  é a corrente elétrica obtida.

Para o cálculo da resistividade volumétrica é necessário considerar um fator geométrico, relacionado com as dimensões do corpo de prova empregado no ensaio. A resistividade elétrica volumétrica é então calculada pela (Equação 3):

$$\rho = R_{cilindro} \cdot \frac{A}{L} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:  $\rho$  = resistividade elétrica do corpo de prova de concreto, onde é considerada o fator geométrico, um dos parâmetros que influenciam no valor da resistividade elétrica final  $R_{cilindro}$  = resistividade elétrica do dispositivo condutor, obtida através da lei de Ohm,  $A/L$  = fator de forma ou fator geométrico, obtido através da relação entre a área ( $m^2$ ) e a altura (m) do corpo de prova, considerado 4 (corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm).

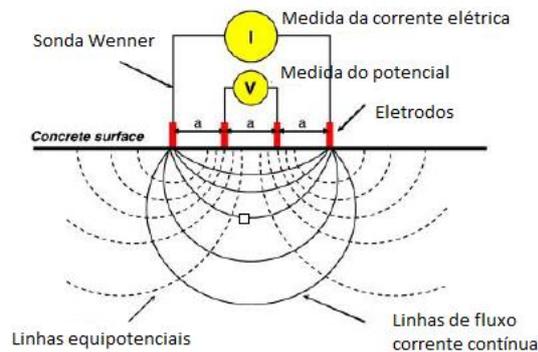
O procedimento de teste baseia-se na imposição de uma corrente alternada constante ao longo do corpo de prova e a obtenção do potencial resultante, sendo que o cálculo da resistência é obtido através da lei de Ohm.

Para a realização deste ensaio, diferentemente da resistividade elétrica superficial, é necessária a extração de corpos de prova de estruturas de concreto existentes ou a coleta de amostras no momento da concretagem.

#### 3.2.6.2 Resistividade elétrica superficial

O método dos quatro eletrodos, também conhecido como método de Wenner é realizado através do emprego de quatro eletrodos posicionados linearmente e equidistantes diretamente na superfície do corpo de prova de concreto, sendo captada a diferença de potencial obtida através da passagem da corrente elétrica nas amostras de concreto. Na Figura 5 encontra-se uma representação esquemática do ensaio de resistividade elétrica superficial pelo método dos quatro eletrodos.

Figura 5 – Sonda Wenner de 4 eletrodos (Adaptado de BEUSHAUSEN, 2015)



A resistividade pode ser calculada como (norma ASTM G57-06):

$$\rho = 2\pi\alpha \frac{P}{I} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:  $\rho$  = resistividade, em  $\Omega$

$\alpha$  = é a distância entre os eletrodos, em m

P = medida do potencial, em V

I = medida da corrente, em A.

Caso um ou mais eletrodos sejam colocados acima ou próximo das barras de aço, como a armadura conduz muito mais corrente do que o concreto, irá surgir um fluxo de corrente heterogêneo e o resultado obtido pode ser ou muito baixo ou muito alto. Portanto, a solução sugerida para o espaçamento dos eletrodos é entre 30 a 50 mm.

Diante da extensa malha rodoviária do Brasil e inúmeras obras de arte especiais, o ensaio de resistividade elétrica surge como uma forma viável em termos de exequibilidade e em termos econômicos, posto que as identificações de processos corrosivos através de inspeções visuais apenas detectam processos corrosivos já em graus muito avançados. Inúmeros autores têm estudado as potencialidades do ensaio de resistividade elétrica (RAJABPOUR *et al.*, 2004; RANADE *et al.*, 2013; BENTZ *et al.*, 2014). Os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistividade elétrica têm sido empregados na previsão ou estimativa de corrosão das armaduras, detecção de fissuras no concreto, detecção do tempo de início de pega em argamassas e concretos e determinação da umidade do concreto. Andrade (2004) desenvolveu uma metodologia para determinação da vida útil das estruturas:

$$T_p = \frac{x_{lim} \cdot \rho}{C} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:  $T_p$  = período de propagação (anos);  $x_{lim}$  = valor limite de perda de seção (cm);  
 $\rho$  = resistividade elétrica do concreto ( $k\Omega \cdot cm$ ); C = constante =  $3 \cdot 10^4$  ( $\mu A/cm^2 \cdot k\Omega \cdot cm$ )

O monitoramento e cálculo da vida útil das OAEs (Obras de Arte Especiais) é um ponto crítico do sistema de transporte, posto que a interdição para reabilitação acarreta transtornos sociais e econômicos, além da questão da segurança do usuário.

No que se refere à relação existente entre os valores obtidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, pode-se dizer que a resistividade elétrica superficial é cerca do dobro daquele obtido para a resistividade elétrica volumétrica (SPRAGG *et al.*, 2012; AZZI; MORAES, 2017). Trata-se de um aspecto importante que deve ser levado em consideração ao se relacionar os resultados obtidos com os normativos existentes, a fim de se obter conclusões verdadeiras.

Mas, é válido ressaltar que ambos os ensaios apresentam um mesmo padrão, ou seja, ocorre um aumento da resistividade elétrica com a idade, sendo que nos 3 primeiros dias os resultados dos dois métodos de ensaio indicaram um valor que corresponde a aproximadamente 20% da resistividade elétrica final do concreto (AZZI; MORAES, 2017).

Na Tabela 9 é apresentado um resumo dos resultados presentes na bibliografia existente, em que os autores efetuaram estudos em concreto com agregado reciclado, de modo a obter um panorama dos valores obtidos para as diferentes propriedades do concreto endurecido, conforme enumeradas neste capítulo.

Tabela 9– Propriedades do concreto endurecido: Compilação de resultados de diversos autores (Fonte: Próprio Autor)

Autor Traço	Traço	1 : m : a/c : % aditivo	% SP <sup>(a)</sup>	% AGR <sup>(b)</sup>	C <sup>(c)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Pré-molhagem	Compensação Volume RCC	Absorção água RCC	Fc <sup>(d)</sup> (MPa)	E <sup>(e)</sup> (GPa)
Bairagi <i>et al.</i> (1993) <sup>(1)</sup>	1	1 : 5,9 : 0,57	-	0	-	Não	Não	Não	(1) 25,1	(1) 28,9
	2	1 : 5,9 : 0,57		25					(2) 24,5	(2) 27,0
	3	1 : 5,9 : 0,57		50					(3) 23,6	(3) 24,8
	4	1 : 5,9 : 0,57		75					(4) 22,6	(4) 22,7
	5	1 : 5,9 : 0,57		100					(5) 21,0	(5) 20,3
Niro <i>et al.</i> (1998) <sup>(2)</sup>	1	Relação a/c de 0,45.	-	0%	-	Não	Não	Não	(1)44,9	
	2	Não foi mencionado os		30%					(2)43,0	
	3	traços/quantitativo de		50%					(3)38,0	
	4	materiais		70%					(4)36,6	
				100%				(5)36,3		
Leite (2001)	1	1 : 5,02 : 0,45	2,5	0%	399,0	Sim. 10 min	Em volume	Sim. 40% tx de abs. RCC	28 dias:	28 dias:
	2	1 : 5,02 : 0,55		100%					(1) 35,6	(1) 26,0
									(2) 25,5	(2) 22,5
Katz (2003) <sup>(3)</sup>	1	1 : 6,72 : 0,55	-	0%	298	Não	Não	Não	(1) 34,6	(1)22,7
	2	1 : 5,74 : 0,56		100%	298				(2) 26,6	(2)14,2
	3	1 : 5,59 : 0,56		100%	300				(3) 25,8	(3)13,3
	4	1 : 5,69 : 0,55		100%	298				(4) 26,8	(4)11,3
Vieira (2003)	1	1 : 7,5 : 0,6	Sim	0%	334,55	Sim, de 10 minutos	Em volume	Sim. 50% tx de abs. RCC	(1)23,0	-
	2		Abatimento	50%					(3)22,0	
	3		fixado em 70 ± 10 mm	100%						
Ângulo (2005) <sup>(4)</sup>	1	1 : 4,45 : 0,5	Sim,	0%	400	Sim. 10 minutos		Sim, 70% tx de abs. RCC	35,0	29,0
	2	1 : 3,55 : 0,5	associado à	100%					(2) + (3): 24,0	(2) + (3): 18,0
	3	1 : 3,51 : 0,5	fluidez da						(4) + (5): 26,0	(4) + (5): 24,0
	4	1 : 3,88 : 0,5	pasta de						(6) + (7): 29,0	(6) + (7):31,0
	5	1 : 3,79 : 0,5	cimento						(8) + (9): 32,0	(8) + (9):32,0
	6	1 : 4,30 : 0,5								
	7	1 : 4,26 : 0,5								
	8	1 : 4,37 : 0,5								
	9	1 : 4,39 : 0,5								
Cabral (2007) <sup>(5)</sup>	1	1 : 4,50 : 0,60	Sim	100%		Sim, 10 minutos	Sim, em volume	Sim, 80% da absorção dos agregados	(1) 23,7	(1) 13,07
	2	1 : 4,65 : 0,60							(2) 26,0	(2)16,68
	3	1 : 4,54 : 0,60							(3)23,5	(3)16,21
Cabral (2007) <sup>(5)</sup>	4	1 : 4,57 : 0,60							(4)24,9	(4)16,00
	5	1 : 4,56 : 0,60							(5)23,63	(5)16,12

Tabela 9– Propriedades do concreto endurecido: Compilação de resultados de diversos autores (Fonte: Próprio Autor)

*continuação*

Autor Traço	Traço	1 : m : a/c : % aditivo	% SP <sup>(a)</sup>	% AGR <sup>(b)</sup>	C <sup>(c)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Pré-molhagem	Compensação Volume RCC	Absorção água RCC	F <sub>c</sub> <sup>(d)</sup> (MPa)	E <sup>(e)</sup> (GPa)
	6	1 : 4,52 : 0,60							(6)26,1	(6)15,62
Rahal (2007) <sup>(6)</sup>	1	1 : 4,18 : 0,65	Sim.	100%	(1) 360	Superfície	Não	Não	28 dias:	28 dias:
	2	1 : 4,18 : 0,65	abatimento		(2) 380	Saturada			(1) 23,6	(1) 11,4
	3	1 : 4,18 : 0,50	60-70 mm)		(3) 400	Seca (SSS)			(2) 22,1	(2) 12,4
	4	1 : 4,18 : 0,50			(4) 420				(3) 26,7	(3) 14,9
	5	1 : 4,18 : 0,48			(5) 460				(4) 25,1	(4) 11,3
	6	1 : 4,18 : 0,48			(6) 360				(5) 28,9	(5) 15,7
	7	1 : 4,18 : 0,43			(7) 380				(6) 27,1	(6) 14,9
	8	1 : 4,18 : 0,43			(8) 400				(7) 31,1	(7) 17,8
	9	1 : 4,18 : 0,40			(9) 420				(8) 28,7	(8) 14,7
	10	1 : 4,18 : 0,40			(10) 460				(9) 33,7	(9) 17,1
									(10) 29,5	(10) 13,4
Berndt (2009)	1	1 : 4,75 : 0,4 : 1%	Sim. 1%	0%	390,4	Sim. 24	Não	-	(1) 42	-
	2	1 : 4,92 : 0,4 : 1%		100%	370,4	horas. Não			(2) 40	
	3	1 : 4,58 : 0,4 : 1%		100%	394,8	é água de			(3) 46	
						amassament				
						o.				
Debieb <i>et al.</i> (2010) <sup>(7)</sup>	1	1 : 6,45 : 0,63 : 0	Abatimento	0%	300	Sim. 4	Não	Sim, de acordo	(1) 39,8	(1)30,8
	2	1 : 6,52 : 0,63 : 0	tronco de	100%		minutos		com o	(2)24,2	(2)19,6
	3	1 : 6,52 : 0,63 : 0	cone de 60-80	100%				Abatimento	(3)22,3	(3)19,7
	4	1 : 6,52 : 0,63 : 0	mm	100%				tronco de cone	(4)23,6	(4)18,4
	5	1 : 6,52 : 0,63 : 0		100%					(5)25,2	(5)19,2
Kou <i>et al.</i> (2012)	1	1 : 4,12 : 0,55	Abatimento	0%	410	-	Em	-	(1) 48,6	-
	2	1 : 4,11 : 0,55	tronco de	20%			volume		(2) 45,3-	
		1 : 4,08 : 0,55	cone de 100	50%					↓7%	
		1 : 4,05 : 0,55	mm	100%					(3) 42,5-	
									↓13%	
									(4) 38,1-	
									↓22%	
Limbachiya <i>et al.</i> (2012)	1	1 : 6,85 : 0,66 : 0	Não	0%	275	Não	Não	Não	25,5	18,5
	2	1 : 6,85 : 0,66 : 0		30%	275				25,0	16,5
	3	1 : 6,32 : 0,61 : 0		50%	295				25,5	14,5
	4	1 : 5,97 : 0,58 : 0		100%	310				24,0	11,5

Tabela 9– Propriedades do concreto endurecido: Compilação de resultados de diversos autores (Fonte: Próprio Autor)

continuação

Autor Traço	Traço	1 : m : a/c : % aditivo	% SP <sup>(a)</sup>	% AGR <sup>(b)</sup>	C <sup>(c)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Pré-molhagem	Compensação Volume RCC	Absorção água RCC	F <sub>c</sub> <sup>(d)</sup> (MPa)	E <sup>(e)</sup> (GPa)
Lovato <i>et al.</i> (2012)	1	1 : 4,38 : 0,50 : 0	Não	0%	775	Sim, 15 minutos	Em volume.	Sim, para atingir abatimento fixo, pois não foi empregado SP.	(1) 32,4	(1)21,2
	2	1 : 6,88 : 0,70: 0	Abatimento	0%	775				19,9	(2)13,2
	3	1 : 4,38 : 0,50: 0	100+-20 mm	100%	529				(3)20,4	(3)13,3
	4	1 : 6,88 : 0,70: 0		100%	529				(4)13,9	(4)9,3
Thomas <i>et al.</i> (2013) <sup>(8)</sup>	1	1: 6,62 : 0,65 0,60	Não	0	275				Compilação resultados de todos os Traços, por percentual de incorporação de agregado reciclado: (1) 0% RCC: 44 (2) 20% RCC:43 (3) 50%: RCC41 (4) 100%:RC C: 40	Compilação resultados Traços: 0% RCC: 36,0 20% RCC:34,5 50% RCC:33,0 100%RCC:32,0
	2	1 : 4,52 : 0,50 0,46		20	380					
	3	1 : 7,09 : 0,65 0,67		50	275					
	4	1 : 4,84 : 0,50 0,53		100	380					
		1 : 5,80 : 0,65 0,51								
		1 : 4,81 : 0,50 0,42			385					
		1 : 7,21 : 0,65 0,59			275					
		1 : 4,45 : 0,50 0,44			380					
		1 : 6,86 : 0,65 0,68			275					
		1 : 4,66 : 0,50 0,53			380					
		1 : 5,69 : 0,65 0,52			325					
		1 : 4,73 : 0,50 0,42			385					
		1 : 6,40 : 0,65 0,57			275					
		1 : 4,35 : 4,35 : 0,50			380					
		1 : 6,52 : 0,65 : 0,67			275					
		1 : 4,41 : 0,50 0,52			380					
		1 : 5,57 : 0,65 0,54			325					
		1 : 4,60 : 0,50 0,44			385					
		1 : 6,17 : 0,65 0,54			275					
		1 : 4,18 : 0,50 0,42			380					
		1 : 6,00 : 0,65 0,70			275					
		1 : 3,99 : 0,50 0,52			380					
		1 : 5,38 : 0,65 0,58			325					
	1 : 4,44 : 0,50 0,49		385							
Abdulla (2015) <sup>(9)</sup>	1	1 : 5,30 : 0,48	-	0%	353	Sim (24 horas)	Sim.	Não	39,7	
	2	1 : 3,75 : 0,48		100%					29,5	
	3	1 : 3,74 : 0,48		100%					28,9	

Tabela 9– Propriedades do concreto endurecido: Compilação de resultados de diversos autores (Fonte: Próprio Autor)

continuação

Autor Traço	Traço	1 : m : a/c : % aditivo	% SP <sup>(a)</sup>	% AGR <sup>(b)</sup>	C <sup>(c)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Pré-molhagem	Compensação Volume RCC	Absorção água RCC	F <sub>c</sub> <sup>(d)</sup> (MPa)	E <sup>(e)</sup> (GPa)
Abdulla (2015) <sup>(9)</sup>	4	1 : 3,84 : 0,48		100%					31,2	
	5	1 : 3,33 : 0,48		100%					27,0	
	6	1 : 3,14 : 0,48		100%					20,5	
	7	1 : 3,63 : 0,48		100%					26,4	
	8	1 : 3,96 : 0,48		100%					37,1	
	9	1 : 3,97 : 0,48		100%					35,8	
Nogueira (2015) <sup>(10)</sup>	1	1 : 5,07 : 0,53 : 0,13%	Sim	0%	355	Não.	Sim, em volume		25,88	-
	2	1 : 4,95 : 0,53 : 0,30%		50%					28,86 (i)	
	3	1 : 4,95 : 0,53 : 0,30%		50%					23,99 (f)	
Silva (2017)	1	1 : 4,76 : 0,55	Sim	0%	381	Sim, pré molhagem de 10 min	Sim.	Sim. 50% taxa de absorção RCC	39,0	
	2	1 : 4,66 : 0,55	Abatimento	50%					38,0	
	3	1 : 4,55 : 0,55	tronco de cone fixo em 100 +-20 mm	100%					37,0	

- a) Percentual de superplastificante (%)
- b) Percentual de substituição do agregado reciclado
- c) Consumo de cimento
- d) Resistência média à compressão (MPa)
- e) Módulo de elasticidade (GPa)
- (1) Bairagi *et al* (1993) empregou agregado reciclado de concreto (20 MPa)
- (2) Niro *et al* (1998) agregado reciclado de classe de resistência 20 MPa
- (3) Katz (2003) empregou agregado reciclado de concreto obtido a partir da britagem de concretos de 3 diferentes idades: 1 dia, 3 dias e 28 dias, respectivamente.
- (4) Ângulo (2005) fez uma separação densitária dos materiais, sendo que os 9 traços que estão presentes nesta planilha são: 1 - Referência, 2 - d< 1,9 composto por material cinza; 3 - d< 1,9 composto por material cerâmico vermelho; 4 - 1,9 <d< 2,2 composto por material cinza; 5- 1,9 <d< 2,2 composto por material cerâmico vermelho; 6 - 2,2 <d< 2,5 composto por material cinza; 7- 2,2 <d< 2,5 composto por material cerâmico vermelho; ; 8 - d>2,5 composto por material cinza; 9- d>2,5 composto por material cerâmico vermelho;
- (5) Cabral (2007) empregou diferentes materiais em sua pesquisa, tais como agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha (ACMV), agregado graúdo reciclado cerâmica vermelha (AGCV), agregado graúdo reciclado de argamassa (AGA), agregado miúdo reciclado de argamassa (AMA), agregado miúdo reciclado de concreto 9AMC) e agregado graúdo reciclado de concreto 9AGC). Nesta planilha foram empregados os traços 35,36,37,38,39 e 40.
- (6) Rahal (2007) empregou em seus estudos agregados reciclados obtidos a partir de diferentes classes de resistência: Classe de resistência C20 MPa (itens 1 e 2), C25MPa(itens 3 e 4), C30 MPa (itens 5 e 6), C40MPa (itens 7 e 8) e C50 (itens 9 e 10)
- (7) Debieb *et al.* (2010) empregou em seus estudos agregado natural (item 1), agregado reciclado obtido após britagem de concreto (RA - VRA), item 2, agregado reciclado obtido após britagem de concreto, sendo contaminado por sulfatos (RA - Su), item 3, agregado reciclado obtido após britagem de concreto, sendo contaminado por cloretos (RA - Cl), item 4 e agregado reciclado obtido após britagem de concreto, sendo contaminado por água do mar (RA - Sw), item 5
- (8) Thomas *et al.* (2013) empregou diferentes traços em sua pesquisa: traços 1 a 8 são da Fase 1 (agregado seco); traços 9 a 18 são da Fase 2(agregado natural e reciclado saturados); traços 19 a 24 são da Fase 3 (agregado reciclado saturados). A segunda relação a/c apresentada seria a relação a/c efetiva
- (9) Abdulla (2015) empregou agregado natural, agregados reciclados de concreto, azulejo, blocos de concreto, tijolo perfurado de 10 furos, tijolo tipo Kura, pedra calcária, rocha e agregado natural de origem marmorítica
- (10) Nogueira (2015) empregou dois métodos de mistura para o concreto produzido com agregado reciclado: inserção do agregado no início da mistura, caracterizando uma pré molhagem; e um segundo método de mistura, adicionando o agregado reciclado ao final da mistura, após todos os demais materiais terem sido adicionados. Os valores para resistência à compressão e módulo de elasticidade foram obtidos através de uma compilação feita pelo autor, para os traços 0%, 20%, 50% e 100%, representado através de gráficos ilustrando a diferença existente entre s diferentes traços.

## 4. DURABILIDADE DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

De acordo com a NBR 6118:2014 as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.

Por vida útil de projeto entende-se o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (NBR 6118:2014). Pode-se dizer que um material atingiu o fim de sua vida útil quando suas propriedades, sob determinadas condições de uso, sofreram tal deterioração de tal forma que não é mais considerado seguro (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Há um consenso geral que a questão da durabilidade das estruturas de concreto deve ser tratada com a mesma importância com que são tratadas as propriedades mecânicas e o aspecto econômico (custos de reabilitação das estruturas). No que se refere à questão econômica, os custos de restauração e reabilitação de estruturas decorrentes da deterioração dos materiais têm se tornado significativos no orçamento da obra. Nos países desenvolvidos, cerca de 40% do total de recursos da indústria da construção têm sido aplicados na reparação e manutenção de estruturas existentes, e aproximadamente 60% em novas estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quanto à durabilidade do concreto produzido com agregado reciclado, estudos revelaram que o desempenho e durabilidade do concreto com agregado reciclado é inferior ao concreto convencional (BEHERA *et al.*, 2014). Este menor desempenho e durabilidade do concreto com agregado reciclado está associado à qualidade inferior do RCC, devido à presença de numerosas fissuras e poros presentes no interior do agregado, tornando-o mais permeável (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002; KOU; POON, 2012; THOMAS *et al.*, 2013).

Como a permeabilidade do concreto é dependente tanto da pasta de cimento quanto da porosidade dos agregados, a utilização de agregados mais porosos irá aumentar a porosidade do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

É possível depreender que a porosidade do agregado reciclado é um fator de controle para uma melhor durabilidade e desempenho do concreto com agregado reciclado. Por isso, é fundamental que seja feito um tratamento especial para obstruir esse ingresso dos agentes externos. É válido ressaltar que o movimento dos vários agentes através do concreto ocorre pelo sistema de poros, onde pode-se citar a difusão e absorção. Assim sendo, a avaliação da absorção de água do concreto é o primeiro passo para estudar a durabilidade do concreto com incorporação de agregado reciclado (BEHERA *et al.*, 2014).

O agregado reciclado apresenta uma variabilidade em suas propriedades decorrentes do processamento, composição, conteúdos e proporções, em grande parte ligados à fonte original de detritos, o que consequentemente resulta na variabilidade das propriedades do concreto.

#### **4.1 Transporte dos agentes agressivos no concreto**

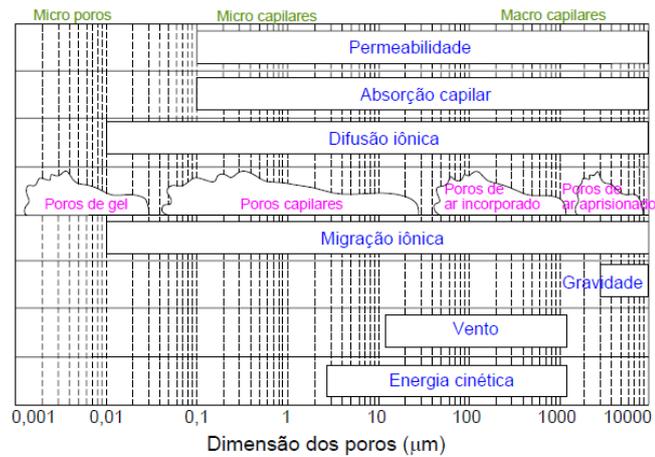
A interação entre as estruturas de concreto armado e seu ambiente de exposição ocorre pela penetração de agentes agressivos presentes no ambiente na forma de gases, vapores e líquidos através dos poros e fissuras do concreto. Aspectos relacionados às características da porosidade do concreto, à concentração das substâncias no ambiente e aos mecanismos de transporte destas substâncias através do concreto influenciam significativamente tal interação (SANTOS, 2006).

Como a durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que os fluidos, tanto líquidos como gases, possam ingressar no concreto e deslocar-se no seu interior, o tamanho, volume dos poros e sua continuidade, assim como o entendimento do mecanismo de transporte dos agentes agressivos no concreto, são fatores importantes para estimar a vida útil das estruturas de concreto, bem como garantir sua qualidade (SILVA, 2006).

Segundo Santos (2006), os principais responsáveis pela penetração de agentes agressivos no interior do concreto são os poros capilares que geralmente são interligados e, portanto, favorecem o transporte das substâncias agressivas. A velocidade do transporte destas substâncias no interior do concreto, no entanto, é determinada pela distribuição do tamanho dos poros.

Na Figura 6 é apresentada a relação entre o diâmetro dos poros e os respectivos fenômenos que atuam nestes:

Figura 6 – Dimensão dos poros relacionados com os principais mecanismos de transporte (Fonte: HELENE, 1993)



Os agentes agressivos penetram no concreto através da rede de poros sendo que os principais mecanismos de transporte são:

- Permeabilidade: fluxo de um fluido submetido a um gradiente de pressão. A facilidade com que um fluido atravessa um sólido poroso está relacionada à sua porosidade, sendo influenciada pela conectividade dos poros capilares do concreto (SANTOS, 2006).

O coeficiente de permeabilidade é obtido aplicando a lei de Darcy para um fluxo laminar, estacionário e não turbulento através de um meio poroso, de acordo com a (Equação 6:

$$V_f = \frac{K_h \cdot A \cdot H}{L} \quad (\text{Equação 6})$$

em que  $V_f$  é a vazão do fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $K_h$  é a permeabilidade hidráulica ( $\text{m/s}$ ),  $A$  é a seção do meio poroso ( $\text{m}^2$ ),  $H$  é a altura da coluna d'água ( $\text{m}$ ), e  $L$  é o comprimento da amostra ( $\text{m}$ ).

De acordo com Neville e Brooks (2013) há grande influência da segmentação dos capilares na permeabilidade o que justifica o fato de que a permeabilidade não é uma simples função da porosidade. É possível que dois corpos porosos tenham porosidades semelhantes, mas permeabilidades diferentes. Poros interconectados resultam em elevada capilaridade, enquanto a porosidade permanece praticamente a mesma.

- Absorção ou sucção capilar: fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. Uma outra definição para esse mecanismo é o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto.

A tensão superficial do líquido que penetra nos poros ocasiona o surgimento de forças capilares que provocam a ascensão do líquido através dos poros. Em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores as pressões capilares (RIBEIRO, 2010), maiores alturas de sucção e maior absorção. Este fenômeno é comprovado pela equação de Young (Equação 7):

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta - \gamma_{SG} = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

em que  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LG}$  e  $\gamma_{SG}$  são os valores de tensão superficial sólido-líquido, líquido-gás e sólido-gás, respectivamente e  $\theta$  o ângulo de molhamento.

A absorvidade do material (S) pode ser obtida a partir de resultados experimentais (Equação 8), onde A é um termo constante que pode ser obtido a partir de resultados experimentais, i é o volume acumulado de água absorvida por unidade de área, e t é o tempo.

$$i = A + S \cdot t^{1/2} \quad (\text{Equação 8})$$

É válido ressaltar que a sucção capilar pode ocorrer apenas no concreto parcialmente seco, esse fenômeno não ocorre no concreto completamente seco ou no concreto saturado (NEVILLE, 2011).

– Difusão de íons: é o processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração. A difusão é um processo espontâneo de transporte de massa por efeito de gradientes de concentração proporcionado por dois diferentes meios em contato íntimo através dos quais a substância se difunde para igualar as concentrações.

Esse fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aqueles em meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras do concreto, os íons cloreto e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm sua penetração controlada por esse fenômeno. Além disso, a penetração do oxigênio, substância essencial para o progresso do processo catódico, também se dá por difusão (SANTOS, 2006).

O fluxo por difusão é definido em dois estágios distintos: o estágio estacionário, caracterizado pelo fluxo constante das substâncias por difusão, e o estágio não estacionário, no qual o fluxo é dependente do tempo e da profundidade de penetração (RIBEIRO *et al.*, 2010). A primeira Lei de Fick é utilizada para o cálculo do coeficiente de difusão no estado estacionário (ou coeficiente de difusão efetivo), sendo representado pela (Equação 9. Para o cálculo do estágio não estacionário (ou difusão aparente) aplica-se a segunda Lei de Fick, definidas pela (Equação 10 e (Equação 11:

$$q_m = -D \frac{\sigma C}{\sigma x} \quad (\text{Equação 9})$$

$$\frac{\sigma C}{\sigma t} = -D \frac{\sigma^2 C}{\sigma x^2} \quad (\text{Equação 10})$$

$$C(x, t) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (\text{Equação 11})$$

em que  $q_m$  representa o fluxo de massa,  $x$  é a profundidade onde se mede a quantidade de massa que penetrou,  $C$  é a concentração,  $D$  é o coeficiente de difusão,  $C(x,t)$  é a concentração da substância a uma distância  $x$ , em um tempo  $t$  e  $C_s$  é a concentração superficial da substância em questão.

– Migração de íons: é o processo de transporte que ocorre quando existe um potencial elétrico que possibilite o deslocamento dos íons presentes para que se neutralize o efeito da diferença de potencial.

Além da difusão de gases, os íons de caráter agressivo, como os íons cloreto, movem-se por difusão através dos poros da água. A difusão iônica é mais eficaz quando os poros da pasta de cimento endurecida estão saturados, mas pode também ocorrer no concreto parcialmente saturado. Vale ressaltar que a influência desse parâmetro é muito menor, se comparado com a permeabilidade (NEVILLE, 2011).

Andrade (1993) define, conceitualmente, que a migração iônica é descrita pela (Equação 12):

$$\text{Fluxo} = \text{difusão pura} + \text{migração elétrica} + \text{convecção} \quad (\text{Equação 12})$$

## 4.2 Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é considerada o problema mais grave de durabilidade. A corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material devido à ação química do meio ambiente, resultando na perda de material (RIBEIRO *et al.*, 2014).

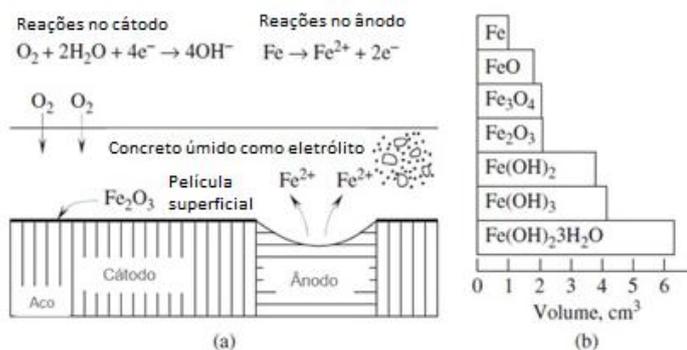
Em uma estrutura de concreto, além da barreira física constituída pela espessura do cobrimento, há também uma barreira química constituída pelo ambiente alcalino, com valores de pH de 12,5 a 13,5, devido à formação do  $\text{Ca(OH)}_2$  (no qual a armadura estaria na sua condição passiva) que, conjuntamente, dificultam a entrada de agentes agressivos. Esta condição, considerada ideal, nem sempre permanece durante todo o período de

serviço de estruturas de concreto devido à penetração de agentes agressivos pelo concreto, que podem atingir a armadura e proporcionar a corrosão do aço.

Em relação à armadura de aço de uma estrutura de concreto, a corrosão, além de deteriorar as propriedades mecânicas da armadura, resulta na formação de um produto volumoso, geralmente  $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  (Figura 7) que, ao exercer uma pressão sobre a cobertura de concreto, pode causar o desprendimento dessa camada (RIBEIRO *et al.*, 2014). Como resultado da formação da ferrugem ocorre também a formação de fissuras bem características, paralelas à armadura, o que facilita a entrada de agentes agressivos, e conseqüentemente ocorre um aumento na taxa de corrosão (NEVILLE, 2011).

Quatro componentes devem estar presentes para que a corrosão ocorra em uma célula macro: o ânodo, o cátodo, o eletrólito e o caminho metálico. A presença das regiões anódica e catódica implica na formação de uma pilha. Como em uma superfície metálica está presente uma grande quantidade de microrregiões anódicas e catódicas, isto implica na formação de uma grande quantidade de pilhas eletroquímicas (RIBEIRO *et al.*, 2014). O eletrólito seria o concreto e o caminho metálico seria a armadura. O progresso da corrosão no ânodo reduz a seção transversal do aço, reduzindo assim a sua capacidade de carga (NEVILLE, 2011).

Figura 7 - .Progressão da corrosão do aço e formação de produtos expansivos: a) processo corrosivo, e b) formação de produtos expansivos de corrosão (Adaptado de LI, 2011)



As reações que ocasionam a corrosão do aço são descritas a seguir.

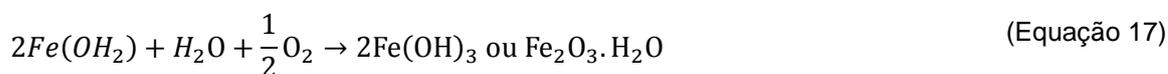
No ânodo o ferro perde elétrons, ocasionando a dissolução do metal (oxidação):



No cátodo ocorre a redução:



Reações de corrosão e formação da ferrugem:



Existem cinco tipos de corrosão eletroquímica: corrosão uniforme, corrosão puntiforme ou por pite, corrosão intragranular, corrosão transgranular e fragilização pelo hidrogênio (RIBEIRO *et al.*, 2014). Nesta pesquisa será dado enfoque à corrosão decorrente da ação dos íons cloreto (corrosão por pites, ocorre de forma localizada) e corrosão induzida por carbonatação (corrosão generalizada).

### 4.3 Ação dos íons cloreto

Nos estudos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado, verifica-se que a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais sérios que podem ocorrer em uma estrutura pois são capazes de despassivar a armadura mesmo em condições de pH extremamente elevado (SILVA, 2006), além de atuar indefinidamente, pois não é consumido no processo de corrosão.

A NBR 12655:2015 especifica o teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto, de acordo com a classe de agressividade e condições de serviço da estrutura, conforme apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto (Fonte: ABNT NBR 12655:2015)

Classe de agressividade <sup>(1)</sup>	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl-) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

<sup>(1)</sup> As classes de agressividade ambiental, que relaciona a agressividade, a classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto e o risco de deterioração da estrutura encontram-se definidas na NBR 12655:2015, sendo que as classes de agressividade I, II, III e IV correspondem a riscos de deterioração da estrutura insignificante, pequeno, grande e elevado, respectivamente.

De acordo com Helene (1993), os cloretos do ambiente podem penetrar em uma estrutura de concreto armado através dos mecanismos clássicos de penetração de água e

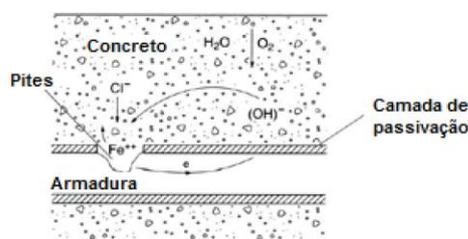
difusão de íons. Desse modo, para que ocorra a contaminação do concreto armado por cloretos, este íon precisa estar dissolvido em água. Como cristal sólido, o cloreto não oferece risco elevado para as estruturas, pois não penetra nos poros do concreto que tem dimensões mais reduzidas que a dos cristais usuais. Apesar disso, no estado sólido, o íon cloreto pode depositar-se na superfície do concreto e aí permanecer até que uma chuva o dissolva e o transporte para o interior da estrutura através de mecanismos como absorção capilar ou difusão.

Para que a corrosão seja iniciada, os íons cloreto quebram a película passivadora e podem ainda acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se, conforme verificado nas reações (RIBEIRO *et al.*, 2014):



O íon cloreto destrói a camada passiva de forma pontual, mas, diferentemente do processo de carbonatação, não ocorre uma redução generalizada do pH do concreto. Na Figura 8 encontra-se representado como ocorre o processo de corrosão na presença de cloretos.

Figura 8 – Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos (Fonte: NEVILLE, 2011)



O cloreto se apresenta de três formas no concreto: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferro aluminato de cálcio ( $C_4AF$ ), formando cloro-aluminato de cálcio ou sal de Friedel ( $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ ); adsorvido na superfície dos poros; e sob a forma de íons livres (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A principal forma de combinação dos íons cloreto é através da reação com o  $C_3A$ , sendo que o percentual de íons combinados varia de 50-80% do conteúdo total de cloretos. Por esta razão, há uma tendência de considerar que cimentos com alto teor de  $C_3A$  apresentam boa resistência à corrosão. Isto pode ser verdadeiro quando os íons cloreto estão presentes no momento da mistura, porque podem reagir rapidamente com o  $C_3A$ . No entanto, quando os íons cloreto ingressam no concreto, uma pequena parcela de cloroaluminatos é formada.

A grande peculiaridade do seu ataque é o fato de que ele não é consumido no processo de corrosão, permitindo que o mecanismo prossiga rapidamente. Este efeito devastador que os cloretos apresentam sobre o concreto armado faz com que seja extremamente necessário o estudo de maneiras para minimizar seu ingresso nas estruturas de concreto (MEDEIROS; HELENE,2008).

- **Efeito do agregado reciclado no concreto**

No que se refere ao ingresso de íons cloreto no concreto produzido com agregado reciclado, foi identificado que a resistência à penetração de íons cloreto desse material é menor do que a do concreto convencional.

Dentre os fatores que reduzem a resistência à penetração de íons cloreto no concreto com agregado reciclado pode-se citar: a maior permeabilidade ocasionada pela existência de argamassa aderida às partículas do agregado reciclado (GOMES; BRITO, 2008), tipo e origem do agregado reciclado, com destaque para maior penetração dos íons cloreto em materiais cerâmicos (GOMES; BRITO, 2008), à presença da maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado (LIMBACHIYA *et al.*, 2012; BEHERA *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2018) e o percentual de substituição do agregado reciclado no concreto (LI, 2008; RAO *et al.*, 2011; KOU; POON, 2012; LIMBACHIYA *et al.*, 2012).

Na Tabela 11 encontram-se identificados a resistência à penetração de íons cloreto no concreto com agregado reciclado.

Tabela 11 – Íons cloreto no concreto com agregado reciclado (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Agregado reciclado	Íons Cloreto		
Gomes e Brito (2009) <sup>(1)</sup>	0%	Coeficiente de migração de cloretos ( $\cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )		
	25% (RCC cerâmico)			
	37,5% (RCC misto)			6,31
	50% (RCC concreto)			7,50
				7,26
		6,66		
Kou e Poon (2012) <sup>(2)</sup>	0%	Penetração de íons cloreto (Coulombs)		
	20%	<u>28 dias</u>	<u>90 dias</u>	
	50%	6200	5100	
	100%	6500	5200	
		6700	5300	
		6900	5500	

Tabela 11 – Íons cloreto no concreto com agregado reciclado (Fonte: Próprio Autor)

continuação

Autor	Agregado reciclado	Íons Cloreto
Limbachiya <i>et al.</i> (2012) <sup>(3)</sup>	0%	Profundidade (mm) x Conteúdo cloretos (%) 0%: <u>Superfície</u> (prof. 0-5 mm): 0,45 / Prof. <u>5-10 mm</u> : 0,38 / Prof. <u>10-15 mm</u> : 0,22 / Prof. <u>15-20 mm</u> : 0,35 30%: 0,50 / 0,42 / 0,18 / 0,15 50%: 0,65 / 0,55 / 0,42 / 0,38 100%: 1,42 / 1,05 / 0,55 / 0,21
	30%	
	50%	
	100%	
Ying <i>et al.</i> (2013) <sup>(4)</sup>	0%	Difusão de íons cloreto ( $10^{-6}$ mm/s) 6,12 11,1 13,0
	50%	
	100%	

<sup>(1)</sup> Gomes e Brito (2008) utilizou a norma NT BUILD 492 na determinação do coeficiente de migração de cloretos

<sup>(2)</sup> Kou e Poon (2012) foi realizado de acordo com a ASTM C1202.

<sup>(3)</sup> Limbachiya *et al.* (2012) empregou agregado reciclado obtido a partir da britagem de concreto com classe de resistência C30, submetidos a cura por 14 dias e posteriormente submetido a ciclos de molhagem e secagem por 42 dias

<sup>(4)</sup> Ying *et al.* (2013) empregou o método RCM (*Rapid Chloride Migration*)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 11, a resistência à penetração de íons cloreto sofreu uma redução como aumento do percentual de agregado reciclado no concreto (KOU; POON, 2012; YING *et al.*, 2013) sendo que, de acordo com Ying *et al.* (2013) pode ser atribuído aos diferentes coeficientes de difusão obtidos para os diferentes componentes da matriz cimentícia, sendo identificado que os valores de difusão de cloretos para a argamassa aderida ao agregado reciclado ( $18,0 \cdot 10^{-6}$  mm/s) apresenta-se maior do que a “nova” argamassa do concreto ( $14,8 \cdot 10^{-6}$  mm/s).

Dos valores apresentados por Limbachiya *et al.* (2012), o concreto com incorporação de 30% de agregado reciclado (se considerarmos a região próxima à armadura, a uma profundidade de 15-20 mm), estaria dentro dos limites da NBR 12655:2015, atendendo às exigências da Classe de Agressividade Ambiental III (concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura).

Os valores obtidos por Kou e Poon (2012) também estão acima do limite do normativo ASTM C1202, sendo considerados concretos com alta penetração de íons cloreto. Como ocorre um decréscimo da migração de cloretos com o aumento da idade, pode ser que caso o ensaio fosse realizado em idades mais avançadas (> 90 dias) a classificação se enquadraria em moderada, posto que ocorre um decréscimo de, em média, 21% entre uma idade e outra (28 dias e 90 dias). Na Tabela 12 encontram-se identificados a classificação à penetração de íons cloreto, de acordo com a ASTM C1202.

Tabela 12 – Penetração dos íons cloreto baseado na quantidade de carga passante (Adaptado de ASTM C1202)

Carga passante (Coulombs)	Penetração de Íons Cloreto
> 4.000	Alta
2.000 – 4.000	Moderada
1.000 – 2.000	Baixa
100 – 1.000	Muito Baixa
<100	Negligente

Nos estudos de Gomes e Brito (2009) é possível identificar um aumento do coeficiente de difusão de cloretos no concreto produzido com agregado reciclado, o que significa que este material é menos resistente à penetração dos íons cloreto. Este coeficiente relaciona a concentração de cloretos no tempo, sendo muito empregado no cálculo da vida útil de estruturas de concreto armado. De acordo com Andrade (2001), o coeficiente de difusão de cloretos deve ser incorporado nos modelos de predição de vida útil a fim de simular a penetração de cloretos que ocorrem nas estruturas reais.

Este aumento do coeficiente de difusão de cloretos está relacionado com a origem e tipo de agregado reciclado empregado, sendo identificado que concretos produzidos com agregado reciclado cerâmico ou misto (cerâmico e concreto) apresentam menos resistência à penetração de íons cloreto do que o agregador reciclado de concreto (GOMES; BRITO, 2009).

Olorunsogo e Padayachee (2002) relataram que o concreto com 100% de agregado reciclado apresentou redução de 17%, 43%, e 65% na condutividade do cloreto, aos 3, 7, 28 e 56 dias, respectivamente, se comparado à idade de 3 dias, no ensaio de difusão de íons cloreto.

Xiao *et al.* (2004) apud Li (2008) relatou que a resistência à penetração de íons de cloreto se torna menor à medida que a quantidade de agregado reciclado aumenta. No entanto, quando esse percentual é inferior a 50%, a resistência à penetração de íons cloreto pode ser especificada como "baixa" baseada na ASTM C1202, e para percentuais acima de 50% a classificação torna-se "moderada".

Através da análise dos valores obtidos na bibliografia, é possível concluir que o percentual de substituição de 30% de agregado natural pelo reciclado não apresenta efeitos significativos no conteúdo de íons cloreto, sendo que este percentual também atende quanto às propriedades mecânicas (LIMBACHIYA *et al.*, 2012). Acima deste limite de substituição, o

Autor menciona que os concretos tornam-se substancialmente mais vulneráveis à penetração de íons cloreto.

#### 4.4 Ação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

A carbonatação pode ser definida como uma reação química entre o cimento hidratado e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Na presença de umidade, o CO<sub>2</sub> forma o ácido carbônico, que reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), formando um carbonato (CaCO<sub>3</sub>), e tem como consequência a redução do pH da solução dos poros do concreto e, por conseguinte, uma diminuição da proteção das armaduras (NEVILLE, BROOKS; 2013).

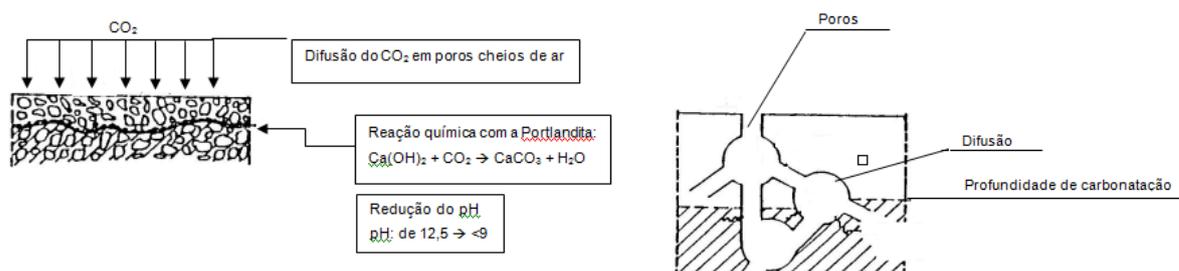
Em relação à durabilidade, a importância da carbonatação reside no fato de que o concreto, quando exposto aos gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) pode ter o pH da solução existente nos poros e da solução intersticial reduzido (RIBEIRO *et al.*, 2014). Essa redução do pH ocasiona a remoção da camada de passivação da armadura, permitindo que tenha início a corrosão.

Essa redução da alcalinidade do concreto, devido à ação do dióxido de carbono, na presença de água e oxigênio, que transforma os compostos do cimento em carbonatos, no processo denominado carbonatação, é regida pela (Equação 20):



A representação do processo de carbonatação encontra-se na Figura 9.

Figura 9 – Representação esquemática de penetração de CO<sub>2</sub> por difusão e do processo de carbonatação. (Fonte: Adaptado de Freire, 2005)



A velocidade de carbonatação pode ser descrita pela (Equação 21):

$$D = Kt^{0,5} \quad (\text{Equação 21})$$

em que D representa a profundidade de carbonatação (mm/ano<sup>0,5</sup>), K é o coeficiente de difusão e t o tempo de exposição, em anos.

Os valores de K giram em torno de 3 ou 4 mm/ano<sup>0,5</sup> para concretos de baixa resistência. Ou seja, um concreto com relação a/c de 0,60, atingiria uma profundidade de

carbonatação de 15 mm em 15 anos, enquanto um concreto com relação a/c de 0,45 levaria 100 anos (NEVILLE, 2011).

Dentre os fatores que exercem influência no processo de carbonatação pode-se citar a umidade relativa do ambiente, sendo o processo de carbonatação mais intenso em ambientes com umidade relativa de 50 a 70% (NEVILLE, 2011); saturação dos poros da matriz cimentícia, posto que a difusão do CO<sub>2</sub> na água é 4 vezes menos do que a difusão no ar, porosidade do concreto que está relacionado com a difusividade; relação a/c que está relacionado à permeabilidade dos gases (RIBEIRO *et al.*; 2014) e presença de fissuras no concreto, que facilitam o ingresso de CO<sub>2</sub> (NEVILLE, 2011).

É válido ressaltar que a ação do CO<sub>2</sub> acontece mesmo em baixas concentrações, como as apresentadas em ambientes rurais, onde a concentração de CO<sub>2</sub> é de 0,03%, em volume (NEVILLE, 2011).

A princípio a carbonatação não causa deterioração do concreto, ocorrendo inclusive um ganho de resistência devido à diminuição da porosidade, decorrente do efeito de tamponamento dos poros.

- **Ação do CO<sub>2</sub> em concretos com agregado reciclado**

A literatura tem demonstrado que o emprego do agregado reciclado no concreto apresenta maior carbonatação, se comparado ao concreto produzido com agregado natural. A magnitude dessa diferença depende de inúmeros fatores relacionados com o uso do agregado reciclado, onde pode-se citar a permeabilidade (ETXEBERRÍA *et al.*, 2007), do percentual de substituição do agregado reciclado (LIMBACHIYA *et al.*, 2012; KOU; POON, 2012; SILVA, 2015), tipo e origem do agregado reciclado (GOMES; BRITO, 2009), tempo de exposição ao ambiente contendo CO<sub>2</sub> (LIMBACHIYA *et al.*, 2012; SILVA, 2017) e uso de aditivos superplastificantes.

De acordo com Thomas *et al.* (2013) a literatura apresenta informações contraditórias a respeito do processo de carbonatação no concreto com agregado reciclado, sendo obtidos menores profundidades de carbonatação (ETXEBERRÍA *et al.*, 2007; MORETTI, 2014) e também maiores profundidades de carbonatação (GOMES; BRITO, 2009; LIMBACHIYA *et al.*, 2012; SINGH; SINGH, 2016; SILVA, 2017). De acordo com Etxeberria *et al.* (2007) a profundidade e o avanço da carbonatação estariam relacionados a permeabilidade do agregado reciclado empregado, se comparado com a nova argamassa formada.

Etxeberria *et al.* (2007) menciona que a taxa e extensão da carbonatação depende da permeabilidade relativa da argamassa antiga e do agregado reciclado utilizado, ou seja, no caso do agregado reciclado ser mais permeável do que a nova argamassa formada, a

profundidade de carbonatação deve ser maior do que aquela do concreto convencional; no entanto se a permeabilidade do agregado reciclado é igual ou menor do que da matriz cimentícia formada, a carbonatação será similar à do concreto convencional, posto que o dióxido de carbono irá penetrar principalmente através da argamassa.

Moretti (2014), em seus estudos, também obteve menores profundidades de carbonatação, sendo atribuído a isso o fato de que os agregados reciclados são constituídos por argamassa de cimento e, conseqüentemente, os concretos produzidos com esse agregado apresentam maior reserva alcalina. Essa reserva alcalina poderia atuar como proteção da superfície do concreto contra a reação da carbonatação (LEVY; HELENE, 2004)

O percentual de substituição do agregado reciclado também é um fator interveniente no processo de carbonatação, sendo que há uma tendência de quanto maior o percentual de substituição do agregado reciclado, maiores as profundidades de carbonatação obtidas. Essa menor resistência à carbonatação estaria relacionada à presença da água, que se encontra armazenada no sistema de poros do concreto com agregado reciclado e seria liberada para o processo de hidratação, contribuindo para o processo de carbonatação. Além disso, há ainda a questão de a carbonatação ocorrer em umidades maiores, ou seja, como o percentual de absorção do agregado reciclado é maior, se comparado com o agregado natural, isso justifica as menores resistência à carbonatação obtidas para o concreto com agregado reciclado (LIMBACHIYA *et al.*, 2012).

A questão do percentual de substituição do agregado reciclado no concreto também é mencionada por Silva (2015), que identificou maiores profundidades de carbonatação para um aumento do emprego deste material, sendo esse aumento na carbonatação atribuído ao fato de que, como a absorção do agregado reciclado é maior do que a do agregado natural, conseqüentemente esse material apresenta maior porosidade, o que reduz a resistência à carbonatação do concreto com agregado reciclado. Kou e Poon (2012) afirmam que este aumento estaria associado a um concreto com maior porosidade, posto que tanto a absorção de água por capilaridade quanto a penetração de íons cloreto apresentaram o mesmo padrão.

O tipo e origem do agregado reciclado também é um fator que influencia na carbonatação do concreto. Em seus estudos Gomes e Brito (2009) realizaram ensaios de carbonatação com concretos produzidos com diferentes tipos de agregado reciclado (concreto, cerâmico e misto), sendo identificado uma profundidade de carbonatação 28% maior nos concretos produzidos com agregado reciclado contendo material cerâmico e concreto, se comparado ao concreto de referência. Isto indica que o ideal seria realizar a

triagem dos materiais que compõem o agregado reciclado, de modo a minimizar o efeito da carbonatação no concreto produzido.

Um outro fator que influencia a profundidade de carbonatação é o tempo de exposição ao dióxido de carbono, sendo que os valores obtidos são proporcionais a esse intervalo de tempo, ou seja, quanto maior esse período, maior a profundidade de carbonatação, conforme identificado nos concretos com 20 semanas de exposição, que apresentaram maior carbonatação do que aqueles submetidos há 4 semanas (LIMBACHIYA *et al.*, 2012).

Quanto ao emprego de aditivos superplastificantes, Matias *et al.*(2013) identificou que o uso de aditivos superplastificantes melhora o desempenho do concreto com agregado graúdo reciclado, o que pode ser identificado através de menores profundidades de carbonatação. O Autor atribui este efeito à uma diminuição da relação a/c, que influencia na porosidade do concreto.

Na Tabela 13 estão identificadas as profundidades de carbonatação dos concretos com agregados reciclados, obtidos em vários estudos.

Tabela 13– Profundidade de carbonatação (mm) de diferentes autores (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Traço / % Agregado reciclado	Idade (dias)	Carbonatação (mm)
Buyle-Bodin e Zaharieva (2002)	(1) 0%	28	(1) 2
	(2) 100%		(2) 4
Gomes e Brito (2009)	(1) RC 0%	90	(1) 5,1
	(2) B50B – 50% RCC concreto		(2) 5,6
	(3) B25C – 25% RCC cerâmico e argamassa		(3) 5,6
	(4) B12,5C25B – 50% RCC concreto, cerâmico e argamassa		(4) 6,6
Kou e Poon (2012)	(1) 0%	28	(1) 5,8
	(2) 20%		(2) 6,1
	(3) 50%		(3) 7,0
	(4) 100%		(4) 7,8

Tabela 13– Profundidade de carbonatação (mm) de diferentes autores (Fonte: Próprio Autor)

<i>continuação</i>			
Autor	Traço / % Agregado reciclado	Idade (dias)	Carbonatação (mm)
Limbachiya <i>et al.</i> (2012) <sup>(1)</sup>	(1) 0%	28	(1) 12,5
	(2) 30%		(2) 14,0
	(3) 50%		(3) 12,5
	(4) 100%		(4) 14,0
	(5) 0%		(5) 5,0
	(6) 30%		(6) 8,0
	(7) 50%		(7) 3,0
	(8) 100%		(8) 3,5
	(9) 0% (1)		(9) 7,0
	(10) 30%		(10) 9,0 <i>continuação</i>
	(11) 50%		(11) 7,0
	(12) 100%		(12) 7,0
Lovato <i>et al.</i> (2012)	(1)50%	28	(1) 14,1
	(2)100%		(2) 23,3
Moretti (2014)	(1) 0%	56	(1) 4,7
	(2) 30%		(2) 4,2
	(3) 50%		(3) 4,2
	(4) 100%		(4) 4,4
Soares <i>et al.</i> (2014)	(1)0%	28	(1) 4,5
	(2)25%		(2) 5,1
	(3)100%		(3) 5,7
	(4)100% RCC: 1,0 %SP		(4) 1,8
Singh e Singh (2016)	(1) 0%	28	(1) 5,0 mm
	(2) 25% RCC		(2) 5,5
	(3) 50% RCC		(3) 6,75
	(4) 75%RCC		(4) 7,5
	(5) 100%RCC		(5) 8,0
Silva <i>et al.</i> (2017)	(1)0%	28	6,0
	(2)25%		7,0
	(3)75%		8,0
Silva (2017) <sup>(2)</sup>	(1) 0%	63	(1) / (2) / (3)/ (4) : -
	(2) 50%		(5) 2,0
	(3) 100%		(6) 4,0
	(4) 0%		(7) 2,5
	(5) 50%		(8) 4,1
	(6) 100%		(9) 7,0
	(7) 0%		
	(8) 50%		
	(9) 100%		

<sup>(1)</sup> Limbachiya *et al.*(2012) empregou agregado reciclado produzidos a partir da britagem de estruturas de concreto armado com diferentes classes de resistência, a saber: C20 (itens 1 a 4), C30 (5 a 8) e C35 (9 a 12)

<sup>(2)</sup> Silva (2017) empregou diferentes relação a/c, tais como 0,35 (itens 1 a 3), 0,45 (4 a 6) e 0,55 (itens 7 a 9)

#### 4.5 Ação combinada do CO<sub>2</sub> e íons cloreto

As estruturas de concreto estão sujeitas a ocorrência de vários mecanismos de degradação, que provocam um efeito sinérgico de deterioração. Desta forma, neste estudo contemplou-se o efeito combinado da ação do CO<sub>2</sub> e dos íons cloretos no concreto, de forma a obter uma melhor representação da vida útil das estruturas de concreto que caracterize, na prática, a exposição a que estas encontram-se submetidas.

É válido mencionar que a profundidade de carbonatação deve ser mensurada antes da profundidade de íons cloreto pois, devido à alteração do pH ocasionada pela ação do CO<sub>2</sub>, a medida da penetração de íons cloreto torna-se impraticável (KIM *et al.*; 2013). Quando o pH está abaixo de 10, é impossível determinar a profundidade de penetração de cloretos livres através da aspersão de nitrato de prata posto que, no caso de a profundidade de carbonatação ser maior do que a profundidade de íons cloreto, não será possível distinguir, através da coloração, a fronteira que (separa a ocorrência) entre um processo e outro.

Os efeitos da carbonatação e dos íons cloretos no concreto, de acordo com Wang *et al.* (2017), podem ser identificados como:

- a) Maior presença de íons cloreto livres, posto que o processo de carbonatação desestabiliza a ligação dos cloretos na formação do sal de Friedel;
- b) Densificação da microestrutura do concreto, devido à precipitação da calcita ocasionada pela reação de carbonatação, dificultando a migração de cloretos;
- c) Aumento da concentração de cloretos em maiores profundidades, devido ao refinamento dos poros ocasionada pela carbonatação, que pode facilitar a absorção capilar dos íons cloreto no concreto.

De acordo YE *et al.* (2016), essa maior concentração de cloretos livres próximo à superfície, devido à precipitação da calcita (CaCO<sub>3</sub>), têm como consequência a formação de um gradiente de cloretos que favorece o ingresso desses íons no interior do concreto.

Quanto ao bloqueio físico gerado pela carbonatação, isso ocorre devido à precipitação do CaCO<sub>3</sub> que, sendo insolúvel, provoca o tamponamento dos poros do concreto (YE *et al.*; 2016).

Em relação ao aumento da concentração de cloretos em maiores profundidades, ocasionada pela alteração na porosidade do concreto devido ao refinamento dos poros, isso pode ser atribuído ao aumento do ingresso de íons cloreto através da absorção por capilaridade, provocando uma corrosão acentuada (ROVENTI *et al.*, 2014).

Outro efeito ocasionado no concreto submetido à exposição de íons cloreto após o processo de carbonatação seria a corrosão acentuada devido a destruição da camada de passivação da armadura, sendo possível identificar pontos localizados de ataque à armadura, através da análise da micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (ROVENTI *et al.*, 2014).

A ocorrência de fissuras deve ser levada em consideração, uma vez que facilita a entrada de agentes agressivos no concreto e propiciam meio adequado de inserção de agentes agressivos na estrutura de concreto (ROVENTI *et al.*, 2014).

Na Tabela 14 encontra-se apresentados os valores obtidos para a carbonatação e cloretos, considerando-se os efeitos isolados destes agentes agressivos do concreto, obtidos em bibliografia existente. É válido ressaltar que todos os resultados apresentados na Tabela 14 referem-se às amostras de concreto de cimento Portland, sem a presença de adições minerais.

Tabela 14 - Profundidade de carbonatação (mm) ou ingresso de íons cloreto em concretos convencionais – Ação isolada dos agentes agressivos (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Ensaio	Ação isolada Carbonatação ou Íons Cloreto
Roventi <i>et al.</i> (2014) <sup>(1)</sup>	<u>Potencial de corrosão</u> Amostras submetidas a carbonatação por 39 dias (ambiente laboratório), seguida de 127 dias em carbonatação acelerada (câmara carbonatação)	Potencial de corrosão de amostras submetidas à carbonatação - Prof. 2,0 cm: 1000 mV / 20 $\mu\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$ - Prof. 1,5 cm: 1000 mV/ 10 $\mu\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$
	<u>Método colorimétrico (fenolfetaleína)</u>	28 dias: 1 cm
Ye <i>et al.</i> <sup>(2)</sup> (2016)	Apenas ensaios combinados	
Wang <i>et al.</i> <sup>(3)</sup> (2017)	<u>Análise do pó do concreto</u> Amostras imersas por 18 meses em solução de 2,98% de NaCl	Frente de penetração íons cloreto Prof. 0 mm (Superfície) / Prof. 10 mm / Prof. 20 mm 1 mês: 0,80 / 0,30 / 0,25 2 meses: 0,81 / 0,35 / 0,30 3 meses: 0,67 / 0,38 / 0,30

Na Tabela 15 encontram-se apresentados os valores obtidos para ensaios em amostras de concreto submetidas à ação do CO<sub>2</sub> e do ingresso dos íons cloreto, a fim de verificar o efeito sinérgico que estes agentes agressivos provocam nas estruturas de concreto.

Tabela 15 – Ação Combinada dos agentes agressivos (carbonatação e cloretos) (Fonte: Próprio Autor)

Autor	Ensaio	Ação Combinada	Carbonatação + Cloretos
Roventi <i>et al.</i> (2014) <sup>(1)</sup>	<u>Potencial de corrosão</u> Amostras submetidas a carbonatação por 39 dias (ambiente laboratório), seguida de 127 dias em carbonatação acelerada (câmara carbonatação), seguida de ciclos de molhagem (1 dia) e secagem (6 dias) em solução de 3,5% NaCl	-1 ciclo (período imersão): -920 mV / 27 µm.ano-1/ (período seco) 850 mV / 4 µm.ano-1	-19 Ciclos: período imersão): -700 mV / 40 µm.ano-1/ (período seco) 600 mV / 10 µm.ano-1
	<u>Análise do pó de concreto</u> Amostras imersas em solução a 3,5% de NaCl (% cloretos/massa concreto x profundidade)	Concentração de cloretos: Após 6 ciclos <sup>(1)</sup> Superfície: 0,29% cloretos totais, em relação a massa do concreto	<i>continuação</i>
Ye <i>et al.</i> <sup>(2)</sup> (2016)	<u>Análise do pó do concreto</u> (% cloretos/massa concreto x profundidade)	Concentração de cloretos: Prof. 0 mm (Superfície) // Prof. 20 mm	
		- Situação I: 2 ciclos: 0,8 / 0,2 4 ciclos: 0,85 / 0,27 6 ciclos: 1,05 / 0,28 8 ciclos: 1,05/ 0,29 10 ciclos: 1,0/ 0,30	- Situação II: 2 ciclos: - / - 4 ciclos: 0,8/ 0,2 6 ciclos: 0,7/ 0,21 8 ciclos: 0,6 / 0,25 10 ciclos: 0,85/ 0,27
		- Situação III: 2 ciclos: 0,6 / 0,2 4 ciclos: 0,67 / 0,20 6 ciclos: 0,63 / 0,20 8 ciclos: 0,70 / 0,25 10 ciclos: 0,75 / 0,30	
Ye <i>et al.</i> <sup>(2)</sup> (2016)	<u>Profundidade de carbonatação (mm)</u>	- Situação II: 2 ciclos: 2,1 4 ciclos: 3,5 6 ciclos: 4,1 8 ciclos: 4,3 10 ciclos: 4,5	- Situação III: 2 ciclos: 4,0 4 ciclos: 5,0 6 ciclos: 6,0 8 ciclos: 6,9 10 ciclos: 7,9
Wang <i>et al.</i> <sup>(3)</sup> (2017)	<u>Coeficiente de migração de cloretos</u> Carbonatação e após cloretos	Antes de 3 meses de carbonatação, submetido a ciclos de secagem-molhagem em solução de NaCl: 0,83 x 10-12 m <sup>2</sup> /s Após 3 meses câmara de carbonatação: 15,63 10-12 m <sup>2</sup> /s	
	<u>Análise do pó concreto</u> (% cloretos/massa concreto x profundidade)	Concentração de cloretos: <sup>(2)</sup> Superfície: 0,7% cloretos totais, em relação à massa do concreto - Profundidade próxima à armadura (20 mm): 0,4%, comparado à concentração de 0,3% de cloretos em concreto submetidos somente a ciclos de secagem e molhagem em solução NaCl.	

(1) Roventi *et al.* (2014) empregou concreto com barras de aço galvanizada em seus estudos, identificando o percentual de cloretos através de ensaiode DRX

(2) Ye *et al.* (2016) inicialmente submeteu as amostras de concreto à imersão em solução de 15% NaCl por 4 dias e depois expostas às condições I, II e III. 03 diferentes situações: I –concretos submetidos a ciclos de molhagem em solução de NaCl a 15% (4 dias), secagem em estufa (2 dias) e secagem em ambiente atmosférico (2 dias); II – concretos submetidos a ciclos de molhagem em solução de NaCl a 15% (4 dias), secagem em estufa (2 dias) e carbonatação acelerada (2 dias) e III – concretos a ciclos de molhagem em solução de NaCl a 15% (4 dias), secagem em estufa (2 dias) e carbonatação acelerada (4 dias), sendo posteriormente submetidas a ciclos de secagem e molhagem (2, 4, 6, 8 e 10 ciclos)

A carbonatação foi medida após os ciclos de cloretos (2, 4, 6, 8, e 10 ciclos)

Cura foi de 28 dias

(3) Wang *et al.* (2017) em seus estudos submeteu os concretos a 3 semanas de exposição à carbonatação acelerada e 3 semanas de ciclos de secagem e molhagem em solução de 2,98% de NaCl. Cura de 56 dias

Segundo Wang *et al.* (2017), verificaram que o efeito combinado do processo de carbonatação e a penetração de íons cloreto interfere na vida útil das estruturas de

concreto, particularmente quando a corrosão da armadura por cloretos é uma preocupação. Como exemplo de estruturas de concreto que se encontram submetidas à ação do  $\text{CO}_2$  e à penetração de cloretos, pode-se citar a mesoestrutura de pontes, túneis de concreto construídos em regiões frias, onde utiliza-se sal no inverno para romper o gelo, sendo que este apresenta uma quantidade significativa de íons cloreto. Além disso, nos centros urbanos próximos a ambientes marinhos é importante considerar o efeito concomitante da carbonatação, cuja velocidade aumenta com a concentração do  $\text{CO}_2$  no ambiente (a concentração de  $\text{CO}_2$  varia nestes locais varia entre 0,03% e 1,2%) (POSSAN, 2010), juntamente com a atuação dos íons cloreto, presentes na água do mar e maresia.

A necessidade premente de minimizar e/ou prolongar a durabilidade das estruturas de concreto armado que, na prática sofrem o processo de carbonatação e penetração de cloretos simultaneamente, torna evidente a necessidade de estudos que melhorem a qualidade do concreto, quando submetido a ambientes de elevada agressividade, sujeitos ao ataque combinado.

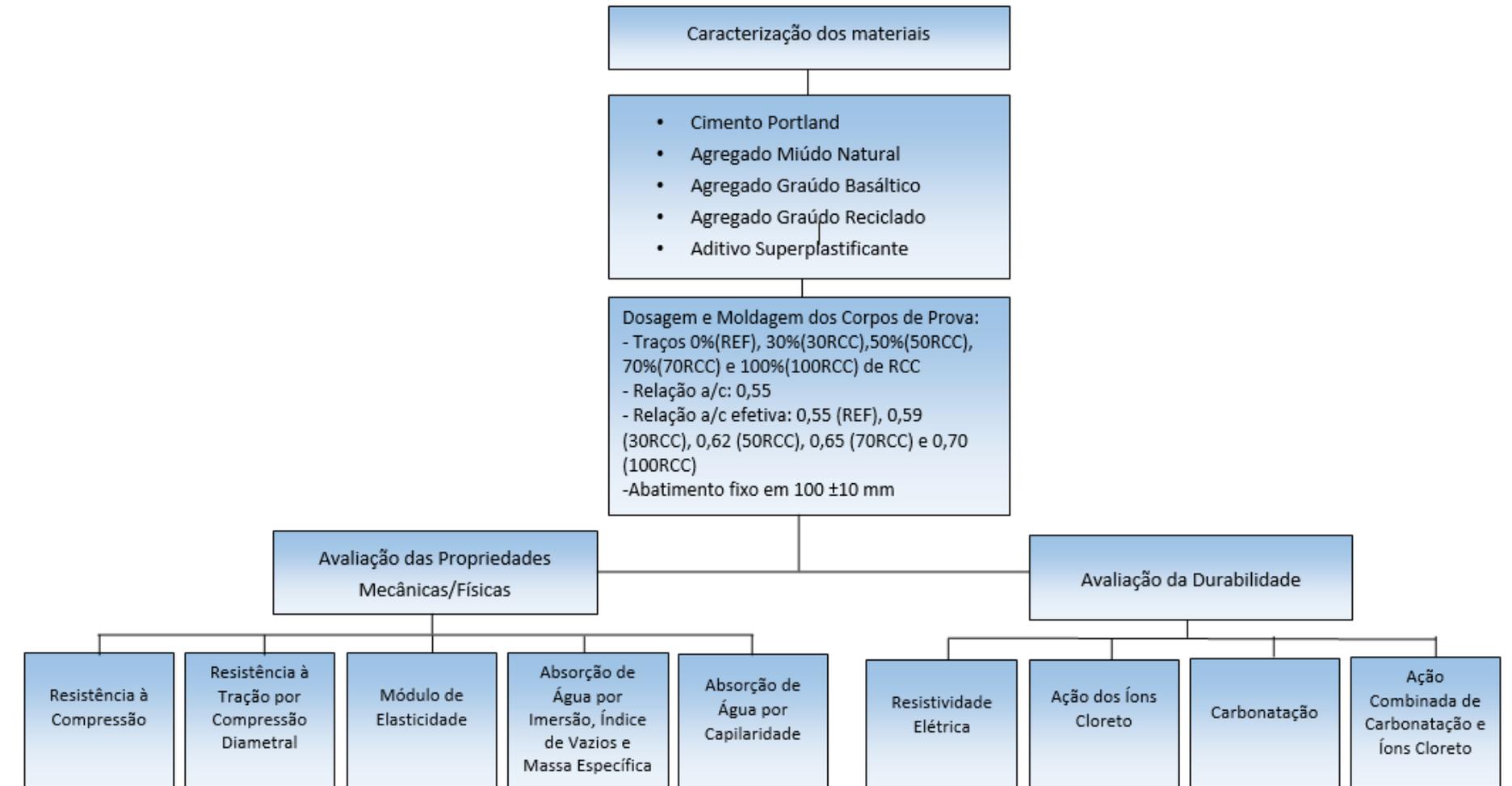
## **5. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Uma das primeiras etapas deste estudo envolveu a coleta dos agregados reciclados e a caracterização de todos os materiais a serem empregados na produção dos concretos para que, posteriormente fosse realizada a dosagem e definição dos traços de concreto com substituição do agregado reciclado.

O programa experimental consiste em analisar as propriedades mecânicas, físicas, e relacionadas à durabilidade dos concretos com a incorporação de agregado reciclado e verificar a viabilidade do seu emprego em concretos.

Na Figura 10 são descritas as etapas do programa experimental:

Figura 10 - Etapas do programa experimental



## 5.1 Materiais utilizados

### 5.1.1 Cimento Portland

Foi empregado o cimento CP II-F 40. A escolha desse aglomerante se deu com o intuito de utilizar um cimento com adição de filler que, por possuir uma granulometria muito fina, aumenta a trabalhabilidade do concreto.

### 5.1.2 Agregado miúdo natural

A areia utilizada neste estudo é natural, areia de rio, sendo comercializada em Brasília/DF e com diâmetro máximo de 4,75 mm e módulo de finura de 2,27. Esse material foi fornecido pela empresa Lemos Areia e Cascalho.

### 5.1.3 Agregado graúdo natural

As britas empregadas são de origem basáltica, sendo utilizada uma composição das duas britas com dimensões máximas características de 12,5 mm e 19,0 mm. Esses materiais também são comumente comercializados na região de Brasília/DF.

Na Figura 11 encontra-se identificados os agregados graúdos naturais empregados na produção dos concretos. Para o maior intertravamento entre as partículas do agregado no concreto foi feita uma composição entre essas duas britas.

Figura 11 – Agregados graúdos naturais: a) Brita com  $D_{máx} = 19,0$  mm e  $D_{máx} = 12,5$  mm



### 5.1.4 Agregado graúdo reciclado

Nesta pesquisa foi empregado o agregado reciclado do Fornecedor de Areia Bela Vista, localizado na região de Sobradinho, região norte de Brasília/DF. O material é obtido a partir da britagem dos resíduos de construção civil e perpassa por várias etapas até atingir o produto final. Na unidade de reciclagem de RCC, podem ser identificadas as seguintes etapas: 1ª etapa – Chegada do resíduo Classe A no local, 2ª etapa – Separação de impurezas que se encontram nesses resíduos Classe A, 3ª etapa – Os resíduos são

encaminhados para unidades de processamento onde os mesmos são britados, lavados e classificados em areia lavada reciclada fina, média e grossa, ou pedra britada.

Na Figura 12 encontram-se identificados os agregados graúdos empregados na produção dos concretos. Para a incorporação do agregado reciclado no concreto, foi necessário empregar dois agregados graúdos reciclados para que fosse possível obter todas as frações granulométricas necessárias para os traços adotados, uma vez que a substituição do agregado graúdo natural foi feita de acordo com a fração, em massa, retida em cada peneira do ensaio de caracterização granulométrica.

Figura 12 - Agregados graúdos reciclados a)  $D_{m\acute{a}x}$  igual a 25,0 mm, b)  $D_{m\acute{a}x}$  igual a 9,5 mm



Ao efetuar uma análise visual do material, é possível depreender que este é composto tanto por concreto como por material cerâmico, não sendo realizada a separação do material cerâmico. O material foi empregado conforme disponibilizado pela fornecedora Areal Bela Vista, que não realiza esse tipo de tratamento nos agregados reciclados fornecidos.

Na Figura 13 são ilustrados alguns dos equipamentos empregados no processo de reciclagem do Fornecedor Bela Vista.

Figura 13 – Unidade de processamento empregado no processo de reciclagem dos agregados reciclados



a) Detalhe do alimentador e britador de entulho

b) Detalhe da esteira e peneira para classificação

### **5.1.5 Aditivo**

Foi utilizado aditivo superplastificante Glenium 51®, à base de éter policarboxílico modificado, fornecido pela empresa Basf®. O aditivo atua como dispersante do material cimentício, possibilitando manter a trabalhabilidade dos concretos.

### **5.1.6 Água**

A água de amassamento foi proveniente da rede pública de abastecimento do Distrito Federal, fornecida pela empresa Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal.

## **5.2 Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova**

A dosagem dos concretos que foram empregados neste estudo foi estabelecida segundo o método de dosagem de Helene e Terzian (1992). O traço foi fixado em 1:m=5, o teor de argamassa empregado foi de 54% e a consistência empregada para todos os traços foi de  $100 \pm 10$  mm.

Para os concretos submetidos às análises mecânicas e físicas foram definidos cinco traços de concreto, com diferentes percentuais de substituição, em volume, do agregado reciclado: 0% RCC (REF), 30% RCC (30RCC), 50% RCC (50RCC), 70% RCC (70RCC) e 100% RCC (100RCC). Na definição dos traços com RCC, a substituição foi feita de acordo com a fração, em massa, retida em cada peneira do ensaio de caracterização granulométrica realizado na composição das britas naturais.

Direcionada pelos valores obtidos referentes às propriedades mecânicas, foram definidos três traços para a avaliação da durabilidade dos concretos produzidos com agregado reciclado: 0% (REF), 30%RCC e 50%RCC. A definição destes três traços para a etapa de durabilidade do concreto deu-se em virtude de os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão. É válido ressaltar que foram mantidos todos os parâmetros dos traços definidos nos ensaios propriedades mecânicas e físicas.

Para a elaboração dos traços com agregado reciclado, a partir da massa retida em cada peneira na distribuição granulométrica, definiu-se que a substituição do agregado reciclado seria em volume, baseando-se nos valores de massa específica dos agregados, posto que o agregado reciclado possui massa específica inferior à do agregado natural. Assim, se fosse aplicada uma simples substituição em massa do agregado natural pelo reciclado, haveria um volume maior de RCC, sendo necessário maior quantidade de cimento, água e aditivo superplastificante para produzir misturas equivalentes ao concreto de referência.

De modo a se obter essa compensação do volume de RCC, foi empregada a (Equação 22.

$$M_{rcc} = M_{brita} \times \frac{\gamma_{rcc}}{\gamma_{brita}} \quad (\text{Equação 22})$$

em que  $M_{rcc}$  = massa do RCC (kg);  $M_{brita}$  = massa da brita (kg);  $\gamma_{rcc}$  = massa específica do RCC ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) e  $\gamma_{brita}$  = massa específica da brita ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ).

Para que a consistência fosse mantida em  $100 \pm 10$  mm, utilizou-se aditivo superplastificante, em porcentagem, calculado sobre a massa de cimento empregado nos traços. Nos concretos com agregado reciclado, foi considerado um adicional de água referente à absorção total de água do agregado reciclado, obtido através do ensaio de absorção de água e, portanto, a relação a/c efetiva dos traços com substituição do RCC apresentou-se maior, conforme pode ser identificado na Tabela 16. É válido ressaltar que essa quantidade de água adicional é variável, conforme a quantidade, em massa, do agregado reciclado definido para cada traço.

Na Tabela 16 são mostrados os traços do concreto de referência e dos concretos com substituição de agregado natural pelo reciclado.

Tabela 16 - Traço do concreto de referência (REF) e dos concretos com agregado reciclado (30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC).

Composição dos traços de concreto										
Traço	Teor de Agregado reciclado	Cimento	Areia	Agregado reciclado	Brita	Aditivo SP (%)	Relação a/c	Relação a/c efetiva	Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) <sup>(1)</sup>	Consumo Cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
REF	0%	1,00	2,24	--	2,76	0,31	0,55	-	2,3881	364,6
30RCC	30%	1,00	2,24	0,76	1,93	0,17	0,55	0,59	2,3305	358,0
50RCC	50%	1,00	2,24	1,26	1,38	0,39	0,55	0,62	2,2779	350,4
70RCC	70%	1,00	2,24	1,77	0,83	0,21	0,55	0,65	2,3067	361,0
100RCC	100%	1,00	2,24	2,53	-	0,43	0,55	0,70	2,2436	355,0

<sup>(1)</sup> A massa específica foi determinada de acordo com a NBR 9833:2008.

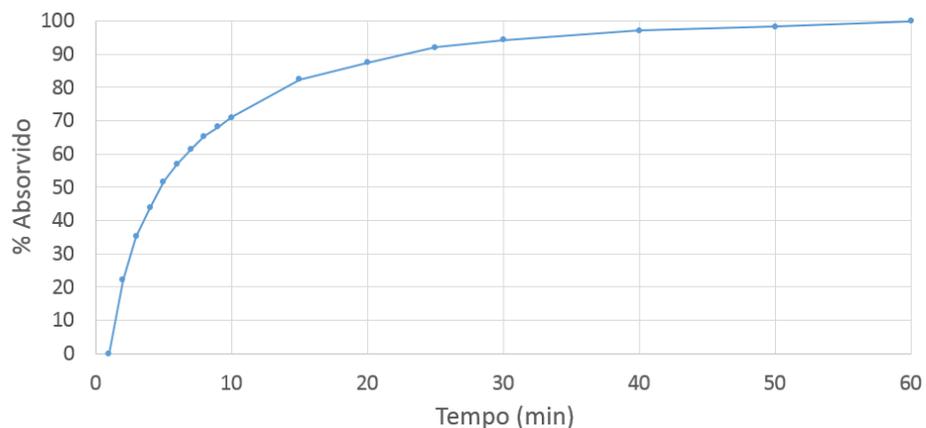
Quanto ao procedimento de mistura dos materiais para a produção do concreto, foi adotado uma pré-molhagem dos agregados reciclados de 20 minutos, pois neste intervalo o agregado reciclado absorve mais de 80% da água e, portanto, esse material não absorveria a água da matriz cimentícia, tornando as misturas pouco trabalháveis. É válido ressaltar que a água empregada na pré-molhagem é considerada nos traços de concreto, sendo adicionada água em quantidade suficiente apenas para cobrir o agregado. Na Figura 14 é ilustrada a pré molhagem dos agregados reciclados.

Figura 14 – Pré molhagem dos agregados reciclados



Esse período de tempo foi determinado através de ensaio de absorção do agregado de RCC, baseado no modelo proposto por Leite (2001). Na Figura 15 está apresentada a curva de absorção do agregado graúdo reciclado (obtido através de ensaio de absorção durante 60 min.

Figura 15- Curva de Absorção do agregado graúdo reciclado (Fonte: Próprio Autor)



De acordo com Leite (2001), em se tratando de agregados porosos como o reciclado, compensar a absorção desse material reduz o risco de diminuição excessiva da relação a/c das misturas devido à absorção.

Posteriormente a essa pré molhagem, foi acrescentado o agregado natural e a areia; sendo ligada a betoneira para que ocorresse a mistura destes materiais. Foi adicionado o cimento e o restante da água do traço ou o adicional de água devido ao agregado reciclado e a betoneira foi ligada. Desligou-se a betoneira para raspar as laterais e adicionou-se aditivo para que o traço do concreto atingisse a trabalhabilidade estabelecida. O tempo total de mistura do concreto foi de aproximadamente 10 minutos. Posteriormente, foi feita a verificação do abatimento do concreto, de acordo com as diretrizes da NBR NM 67:1998.

Imediatamente após a mistura, os concretos foram moldados em corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento, sendo o adensamento realizado com vibrador mecânico, realizado em apenas uma camada, conforme NBR

5738:2015. A cura dos corpos de prova foi feita ao ar, nas primeiras 24 horas e, após este prazo, os corpos de prova foram desmoldados e colocados na câmara úmida, permanecendo nessa condição até as datas dos ensaios.

Na Tabela 17 são detalhados todos os ensaios realizados nesta pesquisa, as idades em que foram realizados, bem como as normas utilizadas na realização dos mesmos.

Tabela 17 – Resumo dos ensaios realizados e métodos empregados

	Ensaio	Idades	Metodologia
Avaliação mecânica e física	Resistência à compressão	7, 14 e 28 dias	NBR 5739:2007
	Resistência à tração por compressão diametral	28 dias	NBR 7222:2011
	Módulo de elasticidade	28 dias	NBR 8522:2008
	Absorção de água por imersão	28 dias	NBR 9779:2012
	Absorção de água por capilaridade	28 dias	NBR 9778:1987
Avaliação da durabilidade	Resistividade elétrica volumétrica	28, 63 e 114 dias	AASHTO TP119-15
	Resistividade elétrica superficial	28, 63 e 114 dias	ASTM G57-06
	Profundidade de penetração de cloretos por ciclos de secagem e molhagem após carbonatação	28, 63 e 91 dias	Colorimétrico com aspersão de AgNO <sub>3</sub> a 0,1M
	Profundidade de carbonatação	28 dias	ISO 1920-12

### 5.3 Avaliação das propriedades mecânicas e físicas dos concretos

#### 5.3.1 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados segundo a NBR 5739:2007 nos concretos de idades 7,14 e 28 dias.

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados para obter uma distribuição uniforme da carga.

#### 5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados nos concretos na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 7222:2001.

#### 5.3.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de deformação foi realizado nos concretos na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 8522:2008, sendo os resultados fornecidos diretamente pelo programa computacional acoplado ao equipamento EMIC®. Destaca-se que antes da

aplicação da carga para verificação do deslocamento, os corpos de prova também foram retificados.

### 5.3.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

A absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foi analisada aos 28 dias de idade em todos os cinco traços de concreto, de acordo com a NBR 9778:1987.

A absorção de água foi calculada através da (Equação 23):

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 23})$$

em que A é a absorção de água (%),  $m_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água, após imersão e fervura(g) e  $m_s$  é a massa da amostra seca(g).

O índice de vazios foi calculado conforme (Equação 24):

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (\text{Equação 24})$$

em que  $I_v$  é o índice de vazios (%) e  $m_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

A massa específica real é obtida pela(Equação 25):

$$\rho_v = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{Equação 25})$$

em que  $\rho_v$  é a massa específica em  $\text{g/cm}^2$ .

### 5.3.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi analisada aos 28 dias de idade em todos os cinco traços de concreto, de acordo com a NBR 9779:2012.

A absorção de água por capilaridade foi calculada através da (Equação 26):

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (\text{Equação 26})$$

em que C é a absorção de água por capilaridade ( $\text{g/cm}^2$ ),  $m_{sat}$  é a massa saturada do corpo de prova (g),  $m_s$  é a massa do corpo de prova seco e S é a área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ ).

## **5.4 Avaliação da durabilidade dos concretos**

### **5.4.1 Resistividade elétrica**

A resistividade elétrica dos concretos foi obtida através do ensaio dos quatro eletrodos (resistividade elétrica superficial) e do ensaio dos dois eletrodos (resistividade elétrica volumétrica), nas idades de 28, 63 e 114 dias de idade nos traços de concreto REF, 30RCC e 50RCC, sendo utilizados 03 corpos de prova/traço na condição saturada superfície seca, para cada idade.

O equipamento empregado na realização dos ensaios foi desenvolvido na Universidade de Brasília - UnB, para realização desta pesquisa. O ensaio foi realizado no SG -11 - Laboratório de Elétrica da UnB e, para aplicar a tensão nos corpos de prova de concreto foi empregado o equipamento Varivolt, tipo VM-215, fornecido pela empresa Sociedade Técnica Paulista S.A. O emprego deste equipamento é justificado pelo fato de que este proporciona a corrente alternada, conforme instruído nos normativos aplicáveis. O emprego de corrente alternada proporciona maior acurácia nos valores de ensaio obtidos (POLDER, 2001).

#### **5.4.1.1 Resistividade elétrica volumétrica**

Para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, onde a corrente elétrica percorre toda a extensão do corpo de prova de concreto, da base até o topo, empregou-se as diretrizes do normativo AASHTO TP 119-15.

Como um bom contato elétrico entre os eletrodos e o corpo de prova de concreto deve ser assegurado, de modo a não interferir nas medidas de resistividade do concreto (PAREDES *et al.*, 2011), foi utilizado um papel filtro embebido na mesma solução de cal hidratada para estabelecer esse contato entre o eletrodo e a amostra de concreto. A resistividade elétrica desse papel filtro foi medida, conforme preconizado pela norma AASHTO TP 119-15, sendo desconsiderada por apresentar um valor infinitamente menor do que o obtido para as amostras de concreto. Além disso, a fim de melhorar o contato entre os eletrodos e o corpo de prova de concreto, os corpos de prova foram retificados.

Na realização deste ensaio, ao aplicar uma tensão nos eletrodos (disco de aço inoxidável) localizados no topo e na base do corpo de prova de concreto, a corrente elétrica percorre toda a extensão da amostra e, através da Lei de Ohm, obtém-se a medida da resistência elétrica (Equação 27).

$$R = \frac{V}{i} \quad (\text{Equação 27})$$

em que R é a resistência elétrica medida em ohm, V é a diferença de potencial elétrico (em volts) e i é a intensidade da corrente elétrica (em ampére).

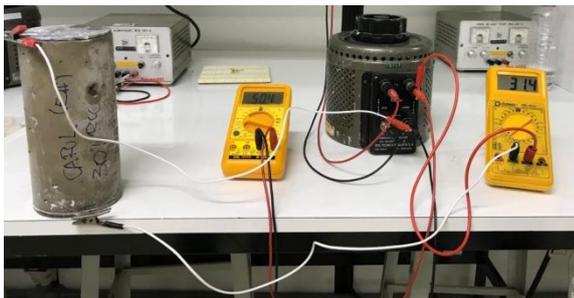
A resistividade elétrica volumétrica do concreto é obtida multiplicando-se a resistência elétrica multiplicada por um fator (A/L), referente à geometria do corpo de prova de concreto, sendo que neste estudo, é de valor 4 (Equação 28).

$$\rho = R_{cilindro} * \frac{A}{L} \quad (\text{Equação 28})$$

em que A = área da seção transversal (cm<sup>2</sup>) e L é o comprimento do corpo de prova (em cm).

Na Figura 16 encontra-se ilustrado o ensaio de resistividade elétrica volumétrica e os equipamentos empregados para a realização do mesmo.

Figura 16 – Equipamento desenvolvido na UnB para ensaio de resistividade elétrica volumétrica



Ensaio de resistividade elétrica volumétrica obtida através da ddp (V) e da corrente (mA)



Detalhe de ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento no SH-11 Laboratório de Elétrica da UnB

#### 5.4.1.2 Resistividade elétrica superficial

Quanto ao ensaio de resistividade elétrica superficial (4 eletrodos), este foi realizado de acordo com a norma ASTM G57-06, de 2012.

A medida da resistividade elétrica é aferida empregando-se quatro eletrodos igualmente espaçados que são posicionados na superfície do corpo de prova de concreto. Os eletrodos externos induzem a corrente elétrica e os dois eletrodos internos medem a tensão. A resistência é calculada através da Equação 27. De posse das medidas de resistência elétrica, obtém-se a resistividade elétrica do concreto através da Equação 29.

$$\rho = 2 * \pi * a * R$$

(Equação 29)

em que a é a distância dos eletrodos.

Na Figura 17 encontra-se identificado ensaio de resistividade elétrica superficial.

Figura 17 – Equipamento desenvolvido na UnB para ensaio de resistividade elétrica superficial



a) Ensaio de resistividade elétrica superficial obtida através da ddp (V) e da corrente (mA) medida nos eletrodos



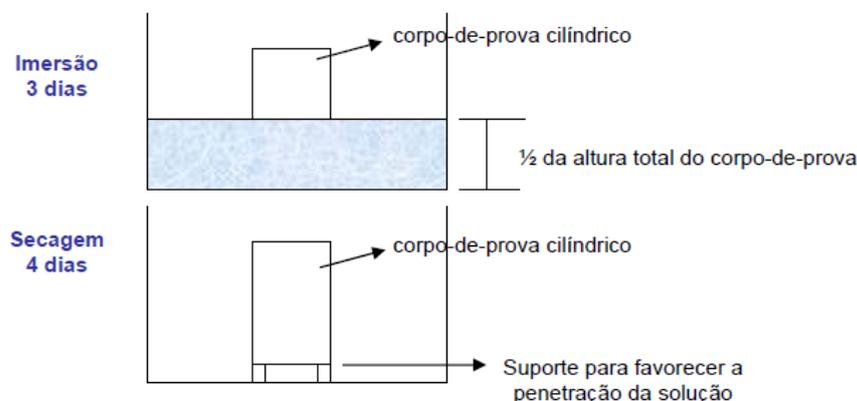
b) Ensaio de resistividade elétrica superficial no SG-11 Laboratório de Elétrica da UnB

#### 5.4.2 Profundidade de penetração dos íons cloreto

A profundidade de penetração de íons cloreto foi verificada aos 28, 63 e 91 dias de idade, nos traços REF, 30RCC e 50RCC, após ciclos de secagem e molhagem dos concretos em solução contendo cloretos. Foram utilizados 03 (três) corpos de prova/traço concreto, para cada idade. A frente de penetração dos íons cloreto foi determinada através da média dos resultados obtidos, em nove diferentes pontos da amostra de concreto.

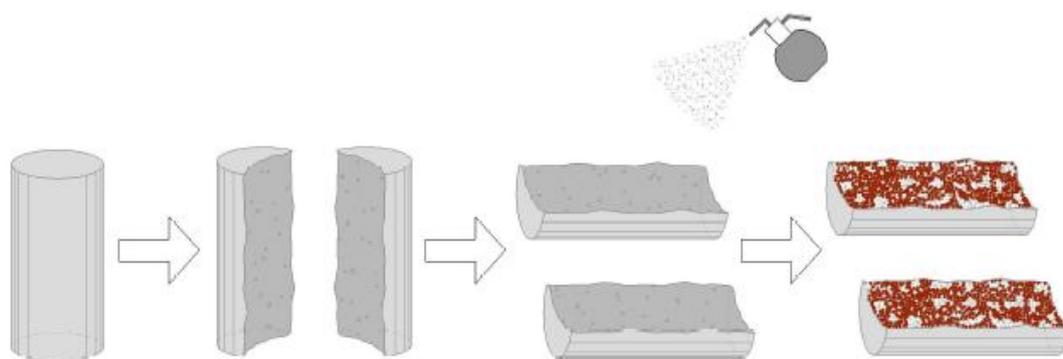
Após a cura úmida dos corpos de prova de concreto, as amostras permaneceram em ambiente de laboratório por 4 dias (etapa de secagem) sendo, posteriormente, imersos parcialmente solução contendo 3,5% de NaCl por 3 dias (etapa de molhagem). A solução foi substituída a cada 15 dias. As amostras de concreto foram submetidas a esses ciclos de secagem e molhagem até as datas dos ensaios (28 dias = 4 ciclos, 63 dias = 9 ciclos e 91 dias = 13 ciclos). Na Figura 18 encontra-se ilustrado o ensaio.

Figura 18 – Ensaio de profundidade de penetração de íons cloreto por ciclos de secagem e molhagem (Fonte: SILVA, 2006)



Ao término de cada idade ou período de tempo determinado para os traços, as amostras foram rompidas à tração por compressão diametral e aspergiu-se uma solução de nitrato de prata na superfície do concreto. Foi empregada solução composta por nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) e água destilada na concentração de 0,1N. Optou-se por essa concentração de 0,1N por esta apresentar uma clara distinção da fronteira de mudança de cor (KIM *et al.*, 2013). Na Figura 19 encontra-se representado esquematicamente o ensaio de profundidade de íons cloreto por aspersão de nitrato de prata 0,1M.

Figura 19 – Procedimento sequencial do ensaio de profundidade de penetração de íons cloreto (Fonte: MOTA, 2011)



A principal aplicação desse método colorimétrico é a determinação da profundidade da frente de penetração de cloretos. Quando a solução de nitrato de prata é aspergiada na superfície do concreto, onde há a presença de cloretos livres ocorre a formação de um precipitado branco (cloreto de prata) e, na região onde ocorre a ausência de cloretos, há a formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (FRANÇA, 2011), conforme (Equação 30):



A opção pelo ensaio de ciclos de secagem e molhagem é que este procedimento simula a condição mais crítica em que uma estrutura de concreto encontra-se submetida, em termos de penetração de íons cloreto.

### 5.4.3 Profundidade de carbonatação acelerada

Os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à carbonatação permaneceram em câmara úmida por 14 dias (cura). Após este período deu-se início ao pré condicionamento das amostras de concreto por 14 dias permanecendo os corpos de prova em um recipiente fechado contendo sílica gel, sendo realizado o controle de estabilização de massa por meio de pesagens, de forma a permitir a desobstrução dos poros preenchidos com água durante a cura e estabilização da umidade interna. Foram utilizados 03 (três) corpos de prova/traço concreto. A profundidade de carbonatação foi determinada através da média dos resultados obtidos, em nove diferentes pontos da amostra de concreto.

A resistência do concreto à carbonatação foi verificada após 28 dias de ataque, sendo que os corpos de prova de concreto foram inseridos na câmara de carbonatação acelerada da UnB. Na Figura 20 encontra-se identificado a câmara de carbonatação onde os corpos de prova permaneceram em meio ambiente na presença de  $\text{CO}_2$ , sendo seguidas as recomendações da norma ISO 1920-12, com adaptações, onde pode-se citar o formato cilíndrico das amostras de concreto, sendo que a norma especifica amostras prismáticas, e não foi considerado fluxo unidirecional do dióxido de carbono.

Figura 20 – Câmara de carbonatação da UnB



A câmara de carbonatação da UnB é dotado de uma solenóide que controla o percentual de concentração de  $\text{CO}_2$  presente dentro da câmara de carbonatação que, conforme instruído na norma ISO 1920-12, deve permanecer igual a  $3 \pm 0,5\%$ , em volume, temperatura igual a  $27 \pm 2^\circ \text{C}$  e umidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ . A circulação contínua e permanente do gás dentro da câmara é realizada através de dispositivos elétricos do tipo

ventoinha. Quanto à umidade, esta é controlada através da inserção de bromato de potássio, sendo este inserido em um recipiente dentro da câmara de carbonatação.

Para a realização do ensaio aspergiu-se solução de fenolftaleína nos corpos de prova de concreto cilíndricos de 10 x 20 cm, rompidos à tração por compressão diametral, dividindo-o em duas metades. Esta solução contém 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada.

Após 24 horas da aspersão da solução, mediu-se a profundidade de carbonatação com o auxílio de um paquímetro digital da marca Digimess® do tipo Universal. O indicador de fenolftaleína apresenta um pH de viragem de aproximadamente 9 e, sendo assim, é possível identificar as regiões que apresentam diferentes valores de pH em um exemplar. Em áreas carbonatadas o pH é reduzido para um valor em torno de 9 e, portanto, essa região irá manter-se incolor. Em áreas em que o pH difere de 9, a tonalidade torna-se magenta, após a aspersão do indicador.

#### **5.4.4 Ação combinada da carbonatação e íons cloreto**

De modo a avaliar o efeito sinérgico dos múltiplos agentes agressivos que atuam durante a vida útil das estruturas de concreto armado, foi proposto um ensaio combinado, em que as amostras de concreto eram submetidas à ação do dióxido de carbono e aos íons cloreto. Esta análise é de fundamental importância à medida que reproduz as condições reais aos quais as estruturas de concreto encontram-se submetidas e possibilita a identificação do processo de degradação do material concreto.

A fim de avaliar a ação combinada da carbonatação e dos íons cloreto no concreto, as amostras de concreto foram inicialmente expostas à carbonatação acelerada (item 5.4.3), sendo posteriormente submetidos a ciclos de molhagem e secagem em solução de 3,5% de NaCl.

Para a determinação da profundidade de penetração de íons cloreto adotou-se o procedimento, descrito no item 5.4.2, para as idades de 28, 63 e 91 dias de idade, nos traços REF, 30RCC e 50RCC.

## 6. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no programa experimental, de acordo com a metodologia descrita no capítulo anterior.

### 6.1 Caracterização dos materiais

#### 6.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o CP II F 40, fornecidos pela empresa Real Mix. Na Tabela 18 estão identificadas as propriedades físicas do cimento.

Tabela 18 – Propriedades físicas do Cimento Portland

Parâmetros	Valores Obtidos	
Massa específica (NBR NM 23:2001)	2,99 g/cm <sup>3</sup>	
Índice de Finura (NBR 11579:2012)	0,84%	
Pasta de consistência normal (NBR NM 65:2003)	a/c = 0,400	
Tempo de início de pega (NBR NM 43:2002)	1:20 hrs	
Tempo de fim de pega (NBR NM 43:2002)	2:10 hrs	
Resistência à compressão (MPa) (NBR 5739:2011)	3 dias	37,6
	7 dias	40,6
	28 dias	48,5

Na Tabela 19 encontra-se identificada a caracterização química do cimento, obtido através de exame de fluorescência de raios-x (FRX), realizado no Laboratório de Química Analítica do Instituto de Química da UnB.

Tabela 19 – Caracterização química do Cimento Portland

Componente Químico	Quantidade (%)	Limites (NBR 11538:1991)
CaO	76,12	
SiO <sub>2</sub>	9,10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,09	
SO <sub>3</sub>	2,73	≤ 4,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,45	
MgO	2,34	≤ 6,5
K <sub>2</sub> O	1,90	
TiO <sub>2</sub>	0,49	
SrO	0,48	
MnO	0,06	
Outros	0,25	

De acordo com a Tabela 19, a composição química indica uma predominância de óxido de cálcio e óxido de silício, característicos das rochas de mármore e granito, respectivamente. Vale ressaltar que o cimento CII-F40 está de acordo com as exigências prescritas na NBR 11578:1991.

### 6.1.2 Agregado miúdo natural

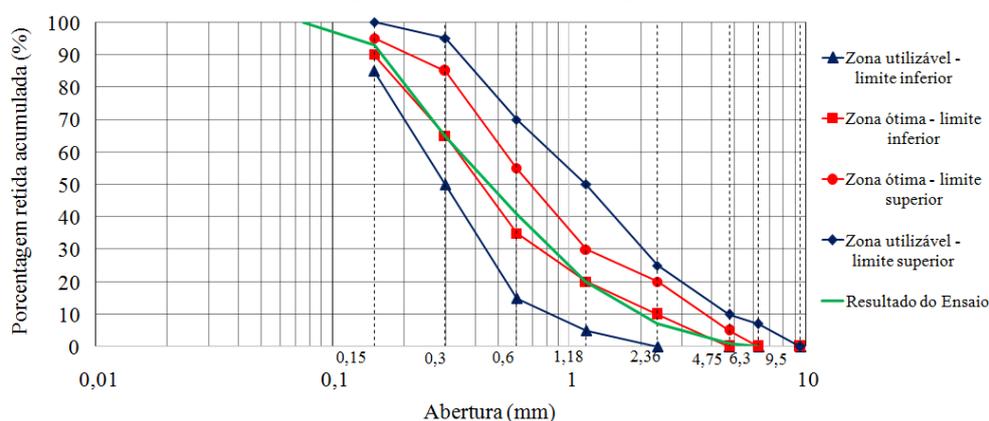
O agregado miúdo natural empregado neste estudo é a areia com diâmetro máximo de 4,75 mm, sendo comumente encontrado na região de Brasília/DF.

A distribuição do tamanho das partículas e a curva granulométrica contendo a distribuição do tamanho das partículas, realizada conforme a NBR 248:2003, estão apresentadas na Tabela 20 e na Figura 21, respectivamente.

Tabela 20 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira # (mm)	Massa retida média (g)	% Retida Média	% Retida acumulada
4,75	3,86	1,3	1
2,36	17,07	5,7	7
1,18	38,98	13,0	20
0,60	61,29	20,4	41
0,30	72,11	24,0	65
0,15	85,94	28,7	93
fundo	20,72	6,9	-
total	299,95	100,00	100

Figura 21 - Curva granulométrica do agregado miúdo



A análise da Figura 21 indica que a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo está na zona ótima, estipulada pela NBR 7211:2009.

A partir da distribuição granulométrica mostrada na Tabela 20 constata-se que a dimensão máxima da areia é de 4,75 mm e o módulo de finura é de 2,27, obtidos conforme

especificado na NBR NM 248:2003. A caracterização física da areia utilizada é apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Propriedades Físicas do agregado miúdo

Parâmetros	Valores obtidos
Composição granulométrica (NBR NM 248:2006)	Dimensão máxima característica = 4,75 mm Módulo de finura = 2,27
Massa específica (NBR NM 9775:2011)	2,67 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária seca e no estado solto (NBR NM 45:2006)	1,49 g/cm <sup>3</sup>

### 6.1.3 Agregado graúdo natural

Nesta pesquisa, com a finalidade de obter a máxima compactidade entre os agregados graúdos, realizou-se a composição de agregados graúdos naturais, de acordo com Helene e Terzian (1992).

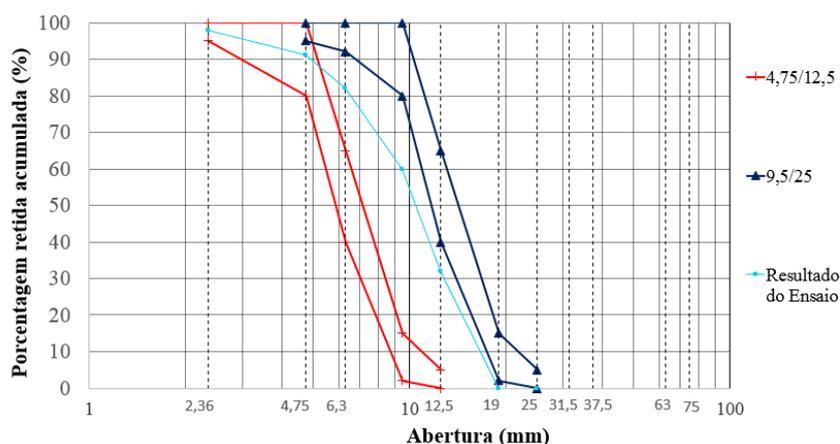
Através da alteração das proporções, em porcentagem, dos agregados graúdos naturais e, determinação da massa unitária no estado compactado referente a cada composição entre dois tipos de agregados naturais, foi obtida a proporção de 70% de agregado de  $D_{máx}$  igual a 19,0mm e 30% de agregado  $D_{máx}$  igual a 12,5 mm. Nesta porcentagem foi obtida a maior massa unitária no estado solto (NBR NM 45:2006) em kg/dm<sup>3</sup>.

A distribuição granulométrica da composição entre os dois agregados graúdos naturais  $D_{máx}$  igual a 19,0 mm e  $D_{máx}$  igual a 12,5mm, conforme NBR 248:2003, é apresentada na Tabela 22, e na Figura 22, respectivamente.

Tabela 22 - Distribuição granulométrica da composição entre os agregados graúdos naturais 70% agregado com  $D_{máx} = 19,0$  mm e 30% do agregado com  $D_{máx}=12,5$  mm.

Peneira # (mm)	Massa retida média (g)	% Retida	% Retida acumulada
25,00	0	0,0	0
19,00	20	0,4	0
12,50	1730	31,6	32
9,50	1300	27,7	60
6,30	1070	22,2	82
4,75	400	8,5	91
2,36	370	7,4	98
1,18	40	0,8	99
fundo	60	1,2	100
Total	4990	100,0	100

Figura 22 - Curva granulométrica da composição entre os agregados graúdos naturais



A caracterização física dos agregados graúdos naturais utilizados é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Propriedades físicas do agregado graúdo utilizado (composição de agregados).

Parâmetros	Valores obtidos
Massa específica do agregado seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,79
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,80
Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,82
Absorção de água (%) (NBR NM 53:2009)	0,3
Massa unitária da composição das britas naturais ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 45:2006)	1437,0

#### 6.1.4 Agregado graúdo reciclado

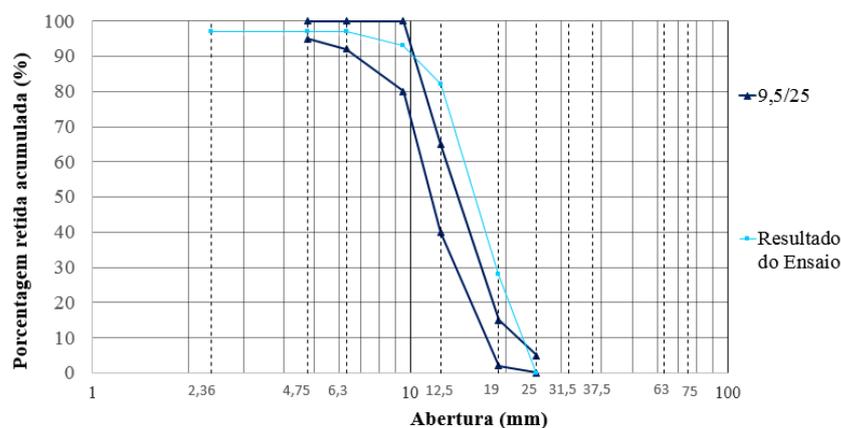
O agregado graúdo reciclado empregado neste estudo foi fornecido pela Fornecedora Bela Vista, sendo comercializados na região de Brasília/DF. Como a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado foi feita de acordo com a fração, em massa, retida em cada peneira do ensaio de caracterização granulométrica realizado na composição das britas naturais, foi necessário o emprego de dois tipos de agregados reciclados, de modo a se obter todas as frações granulométricas necessárias aos traços. Assim, empregou-se agregado reciclado com  $D_{\text{máx}}$  igual a 25,00 mm e agregado reciclado com  $D_{\text{máx}}$  igual a 9,5 mm.

A distribuição granulométrica do agregado reciclado com  $D_{\text{máx}}$  igual a 25,00 mm, conforme a NBR 248:2003, está representado na Tabela 24 e Figura 23, respectivamente. O ensaio de granulometria foi realizado com o objetivo de caracterizar o material agregado reciclado, a fim de determinar qual a fração predominante, em termos percentuais. Na dosagem do concreto, a substituição do agregado natural pelo reciclado foi realizado proporcionalmente, de acordo com a fração retida, em cada peneira, do agregado natural.

Tabela 24 - Distribuição granulométrica do agregado reciclado com  $D_{m\acute{a}x} = 25,0$  mm

Peneira # (mm)	Massa retida média (g)	% Retida	% Retida acumulada
25,00	0	0,0	0
19,00	1710,0	28,4	28
12,50	2539,8	53,9	82
9,50	489,7	11,1	93
6,30	139,4	4,1	97
4,75	19,6	0,4	97
2,36	9,7	0,3	97
1,18	8,9	0,3	97
0,60	10,3	0,2	97
0,30	17,2	0,4	97
0,15	12,3	0,3	97
fundo	29,2	0,6	100
Total	4986,1	100,0	100

Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado ( $D_{m\acute{a}x} = 25,0$  mm)



A distribuição granulométrica do agregado reciclado com  $D_{m\acute{a}x}$  igual a 9,5 mm, conforme a NBR 248:2003, está representado na Tabela 25 e na Figura 24, respectivamente.

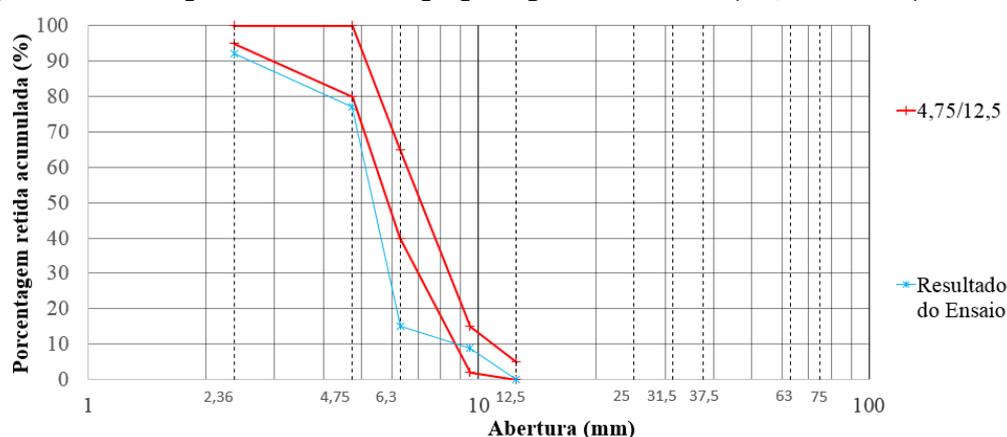
Tabela 25- Distribuição granulométrica do agregado reciclado com  $D_{m\acute{a}x} = 9,5$  m

Peneira # (mm)	Massa retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada
19,00	0,0	0,0	0
12,50	1,7	0,2	0
9,50	3,9	0,5	0
6,30	75,4	8,5	9

Tabela 25- Distribuição granulométrica do agregado reciclado com  $D_{m\acute{a}x} = 9,5 \text{ m}$  continuação

Peneira # (mm)	Massa retida média (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	37,1	5,5	15
2,36	631,0	61,8	77
1,18	165,0	15,4	92
0,60	35,3	3,4	95
0,30	18,2	1,9	97
0,15	10,3	1,1	98
fundo	19,8	2,0	100
total	997,8	100	100

Figura 24 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado ( $D_{m\acute{a}x} = 9,5 \text{ mm}$ )



A caracterização física dos agregados graúdos reciclados está identificada na Tabela 26.

Tabela 26 – Propriedades físicas dos agregados reciclados

Material	Parâmetros	Valores obtidos
Brita reciclada com $D_{m\acute{a}x} = 25,0 \text{ mm}$	Massa específica do agregado seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,35
	Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,49
	Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,72
	Massa unitária ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (NBR NM 45:2006)	1441,40
	Absorção de água (%) (NBR NM 53:2009)	5,85
Brita reciclada com $D_{m\acute{a}x} = 9,5 \text{ mm}$	Massa específica do agregado seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,45
	Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,55
	Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (NBR NM 53:2009)	2,78
	Absorção de água (%) (NBR NM 53:2009)	5,22

### 6.1.5 Aditivo

Na dosagem dos concretos utilizou-se o aditivo superplastificante Glenium 51®, à base de éter policarboxílico modificado, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Caracterização do aditivo superplastificante Glenium ® 51 (Fonte: BASF S.A)

Aspecto	Líquido branco turvo
pH	5-7
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 – 1,107
Teor de Sólidos (%)	28,0 - 31,0

## 6.2 Propriedades do concreto fresco

### 6.2.1 Massa específica

As massas específicas dos concretos, determinadas de acordo com a ABNT NBR 9833:2008, são mostradas na Tabela 28.

Tabela 28 - Massa específica dos concretos

Massa específica dos concretos (kg/m <sup>3</sup> )				
REF	30RCC	50RCC	70RCC	100RCC
2388	2331	2278	2251	2244

Em análise aos valores obtidos é possível identificar um decréscimo de até 6% da massa específica dos concretos, conforme há um aumento do percentual de substituição do agregado reciclado.

De posse dos valores apresentados na Tabela 28 foi calculado o consumo de cimento para cada traço, conforme identificado na Tabela 29.

Tabela 29 - Consumo de cimento dos concretos

Consumo de cimento dos concretos (kg/m <sup>3</sup> )				
REF	30RCC	50RCC	70RCC	100RCC
364,6	360,2	354,3	343,7	342,5

Quanto ao consumo de cimento, como o agregado reciclado apresenta-se mais poroso do que o agregado natural, para que o consumo de cimento fosse equivalente ao concreto referência, seria necessária uma maior quantidade de cimento nos traços com incorporação de agregado reciclado. Como a quantidade de cimento, em massa, foi a mesma para todos os traços, é possível identificar uma redução de até 6% no consumo de cimento dos concretos, para o traço com maior percentual de substituição do agregado reciclado (100%).

É válido ressaltar que o consumo de cimento atende às prescrições da NBR 12655:2015, sendo que todos os traços apresentaram consumo de cimento superior a 320 kg/m<sup>3</sup>, conforme instruído neste normativo.

### 6.2.2 Consistência

O ensaio de determinação do abatimento do tronco de cone foi realizado de acordo com a NBR NM 67:1998. Na Tabela 30 são apresentados os valores das consistências obtidos para os concretos estudados.

Tabela 30 - Consistência dos concretos

Consistência dos concretos (mm)				
REF	30RCC	50RCC	70RCC	100RCC
110	100	105	110	110

Através da análise da Tabela 30 é possível identificar que os resultados das consistências dos concretos variaram de 90 a 110 mm, como esperado. Destaca-se que, para atingira consistência desejada, foi adicionado superplastificante em todos os concretos, sendo que os teores de dosagem do aditivo variaram de 0,17% a 0,43%.

## 6.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

### 6.3.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias. Os valores do ensaio de resistência à compressão dos concretos estão apresentados na Tabela 31 e no gráfico representado pela Figura 25.

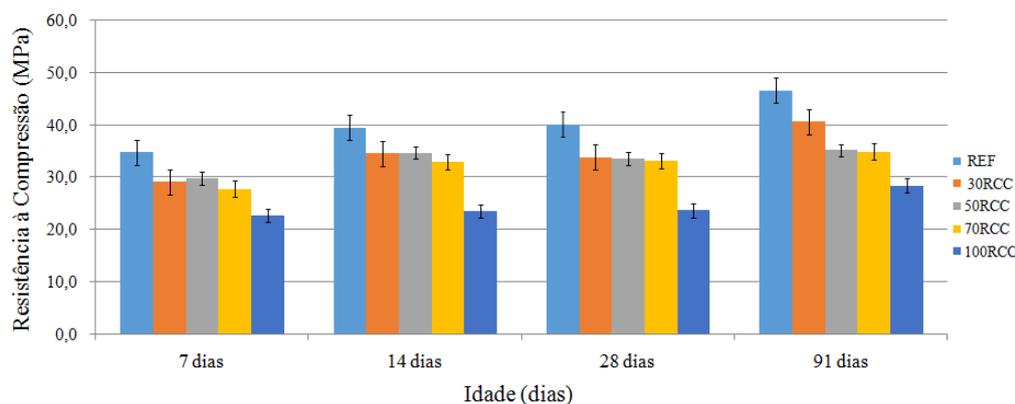
Tabela 31 - Resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 91 dias dos concretos

Traço do Concreto	Resistência à Compressão (MPa)											
	7 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>	14 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>	28 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>	91 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>
REF	34,7	2,4	6,8	39,4	0,8	2,1	40,2	2,9	7,2	46,6	1,3	2,7
30RCC	29,1	1,9	6,6	34,5	2,8	8,2	33,8	2,1	6,4	40,6	1,5	3,6
50RCC	29,8	1,7	5,6	34,7	0,9	2,6	33,6	2,8	8,3	35,1	3,0	8,6
70RCC	27,7	2,7	9,7	32,9	1,3	4,0	33,1	2,1	6,3	34,8	0,6	1,6
100RCC	22,6	0,3	1,4	23,5	0,9	3,6	23,6	1,1	4,5	28,4	1,2	4,4

<sup>(1)</sup> DP = Desvio Padrão

<sup>(2)</sup> CV = Coeficiente de Variação

Figura 25 – Resistência à compressão simples dos concretos



Os valores apresentados são a média dos resultados obtidos para o ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova.

Na idade de 7 dias, o concreto de referência apresentou o maior valor médio de resistência a compressão. Considerando o valor médio da resistência dos traços 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC, houve uma redução de cerca de 16%, 14%, 20% e 35% para os traços 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC, respectivamente, em comparação ao concreto de referência, conforme pode ser identificado na Figura 25.

Nos estudos desenvolvidos por Yehia *et al.* (2015), o aumento da resistência dos concretos produzidos com agregado reciclado, na idade de 7 dias, foi menor, o que vai de encontro ao obtido nesta pesquisa, sendo que isso pode ser atribuído ao tipo de cimento utilizado, às diferentes condições de cura em que as amostras foram submetidas, entre diversos fatores.

Os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC apresentaram valores médios de resistência à compressão aos 7 dias superiores a 25 MPa, como nos estudos de Moretti (2014). Além disso, vale ressaltar que as percentagens de redução de resistência à compressão dos traços com incorporação de agregado reciclado em relação ao concreto de referência também se apresentaram bem próximos.

Quanto aos valores de resistência à compressão aos 14 dias, foi identificado o mesmo comportamento observado aos 7 dias, ou seja, os traços 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao concreto de referência. Considerando o valor médio da resistência dos traços 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC, houve uma redução de resistência de 12%, 12%, 16% e de 40%, respectivamente, em comparação ao concreto de referência. No que se refere à resistência à compressão aos 28 dias, através da análise dos dados é possível identificar que os valores de resistência à compressão aos 28 dias não apresentaram aumento significativo em relação aos valores

obtidos na resistência à compressão aos 14 dias. O maior aumento, em porcentagem, foi verificado para o traço de Referência, que apresentou um aumento de 2% para a idade de 28 dias, em relação à idade de 14 dias. Ao se analisar o decréscimo dos valores médios de resistência à compressão dos traços com substituição de RCC em relação ao concreto de Referência, os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC apresentaram cerca de 17%, e somente o traço 100RCC apresentou uma maior redução, de cerca de 41%, aos 28 dias.

O comportamento identificado para os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC, em relação ao Referência, vão ao encontro do que foi identificado por Moretti (2014) em sua pesquisa. Rahal *et al.* (2007) também identificou um decréscimo na resistência mecânica, da ordem de 20%, 30% e 45%, para percentuais de substituição de 30%, 50% e 100% de agregado reciclado, na idade de 28 dias e atribui esta diferença significativa a diversos fatores, tais como a origem do agregado reciclado e a relação a/c dos concretos, reforçando a necessidade de se estudar os materiais disponíveis em cada localidade para identificar um padrão de comportamento.

A utilização do agregado reciclado provocou uma redução na resistência à compressão dos concretos para todas as idades analisadas. Considerando a média dos valores obtidos nos ensaios, para a idade de 28 dias foi notada a maior redução, sendo de 41% para o traço 100RCC em relação ao traço de Referência.

Para a idade de 91 dias, a redução, em porcentagem, dos traços 50RCC e 70RCC foi de 25%, maior do que nas idades apresentadas anteriormente. Para o traço 100RCC o comportamento seguiu o mesmo padrão identificado na idade de 7, 14 e 28 dias, ou seja, uma redução de cerca de 40% em relação ao Referência. Foi possível identificar também um aumento significativo nas resistências à compressão simples dos traços de concreto, em relação aos valores obtidos para a idade de 28 dias. O traço REF apresentou um aumento de 14% enquanto o traço 100RCC apresentou um incremento de 17%. Estes acréscimos de resistência, em porcentagem, para estes dois traços, são similares aqueles obtidos por Moretti (2014).

Em estudo desenvolvido por Leite (2001), para relações a/c maiores (maior que 0,60), todos os concretos com pelo menos algum tipo de substituição do agregado natural pelo reciclado tiveram desempenho melhor ou muito semelhante aos dos concretos de referência. Nesta pesquisa foi identificada uma redução de 16% para os traços 30RCC e 50RCC e de 18% para o traço 70RCC, para a idade de 28 dias.

A resistência à compressão dos traços 30RCC, 50RCC e 70RCC demonstram que estes concretos podem ser empregados como concretos estruturais, conforme NBR 8953:2015. Vale ressaltar que, em termos econômicos, o concreto com agregado reciclado

apresentou-se vantajoso posto que além de empregar agregados reciclados, apresentou consumo de cimento menor do que o concreto de referência, sem que ocorresse uma significativa redução na resistência à compressão. Segundo Yehia *et al.* (2015) um percentual de substituição de até 30% de agregado reciclado não ocasionaria efeitos significativos na resistência do concreto.

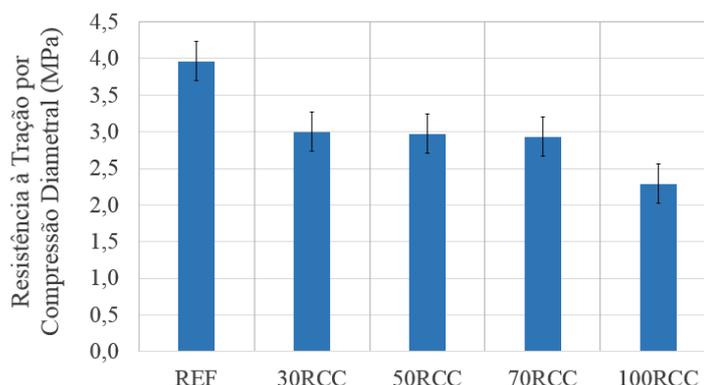
### 6.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi medida aos 28 dias de idade. Os valores médios obtidos encontram-se na Tabela 32 e no gráfico representado pela Figura 26.

Tabela 32 - Resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias dos traços de concreto

Traços	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	4,0	0,7	17,4
30RCC	3,0	0,1	3,4
50RCC	3,0	0,3	9,8
70RCC	2,9	0,7	24,1
100RCC	2,3	0,3	13,3

Figura 26 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias



Assim, como nos resultados obtidos para a resistência à compressão, é possível identificar que o maior valor obtido foi encontrado para o concreto de referência, que apresentou o valor de 4,0 MPa. Houve uma diminuição significativa para o concreto 100RCC, cuja resistência à tração por compressão diametral de 2,3 MPa representa uma queda de cerca de 30% se comparado ao concreto de referência.

Segundo Leite (2001), a presença do agregado graúdo reciclado reduz muito a resistência à tração do concreto. Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral, caso seja interpolado para a relação a/c de 0,55, são similares aos obtidos no

estudo de Leite (2001), sendo identificado um menor decréscimo, em porcentagem, se comparado os valores obtidos para o Referência e o traço 100RCC, da ordem de 7%.

Os valores médios dos traços REF e 50RCC foram superiores aos valores obtidos no estudo desenvolvido por Moretti (2014). Yehia *et al.* (2015) menciona que não há um padrão definido para a resistência à tração dos concretos produzidos com agregado reciclado, sendo esta propriedade mais dependente da qualidade da pasta do que do tipo de agregado.

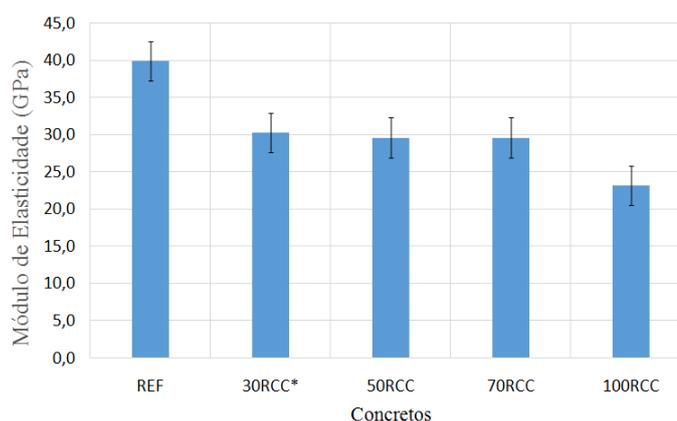
Há muito sabe-se que a resistência à tração segue o mesmo padrão da resistência à compressão, para os concretos convencionais. Além disso, os traços 30RCC e 50RCC apresentaram valores de propriedades mecânicas equivalentes ao concreto referência, sendo que para os demais traços houve decréscimo tanto para a resistência à compressão quanto à resistência à tração.

Silva e Andrade (2017) justificam essa redução devido à fraca ligação que se forma entre a matriz do cimento hidratado e o agregado reciclado, devido à presença de argamassa aderida.

### 6.3.3 Módulo de elasticidade

Os módulos de elasticidade foram obtidos para a idade de 28 dias, sendo a média dos valores obtidos apresentada na Figura 27. Neste ensaio foram empregados 03 (três) corpos de prova para cada traço.

Figura 27 - Módulo de elasticidade dos concretos estudados aos 28 dias



<sup>(1)</sup> \*valor de módulo de elasticidade foi obtido através de cálculo teórico, posto que não foi possível realizar o ensaio devido a problemas no equipamento. Foi empregado o coeficiente  $\alpha_E = 1,0$  (granito e gnaisse)

Os valores médios obtidos para os traços de concreto analisados estão em conformidade com os resultados apresentados por Moretti (2014), sendo que somente para o traço REF o valor obtido foi bastante superior, posto que o valor obtido neste estudo foi 39,9 GPa e o valor obtido por Moretti (2014) foi 31,1 GPa, ou seja, um aumento de cerca de

25%. Essa diminuição do módulo de elasticidade para os traços em que foi substituído o RCC pode ser atribuída a fato de o RCC apresentar maior porosidade e menor densidade quando comparado com a brita basáltica, fato que explica o menor módulo de elasticidade obtido para os traços onde a brita foi substituída parcialmente ou totalmente por RCC (MORETTI, 2014).

Os valores obtidos neste estudo também seguiram o mesmo padrão dos resultados de Benetti (2012), apresentando um decréscimo do módulo de elasticidade de 22% para o concreto com substituição de 50% do agregado reciclado, em relação ao concreto referência. Os valores obtidos pela Autora, para os diferentes percentuais de substituição do agregado reciclado, também foram similares aos obtidos neste estudo, sendo obtidos valores de módulo de elasticidade de 32,96 MPa, 31,69 MPa, 29,74 MPa e 23,985 MPa, para teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

Ao se calcular os valores de módulo de elasticidade teórico, foram identificadas certas disparidades em relação ao módulo de elasticidade experimental (NBR 6118:2014). Os valores obtidos foram 32,2 GPa, 28,1 GPa, 29,3 GPa e 25,7 GPa, para o concreto REF, 50RCC, 70RCC e 100 RCC, respectivamente, sendo possível identificar uma variação de até 20%, no caso do concreto de referência. A isto pode ser atribuído ao fato de que os modelos estimativos do módulo de elasticidade teórica não conseguem abranger todas as condicionantes que influenciam no valor desta propriedade e, além disso, nesses modelos não é considerado o agregado reciclado que, além de apresentar-se bem heterogêneo em termos de composição, se comparado com os agregados naturais, ainda apresenta outras particularidades como a presença de argamassa aderida aos agregados.

De acordo com Leite (2001), quanto maior o teor de substituição do agregado gráudo natural pelo reciclado e, quanto menor a resistência dos concretos, maiores são as reduções observadas no módulo do concreto reciclado em relação ao de referência. Esta afirmação vai ao encontro dos resultados obtidos, que indicam um decréscimo maior do módulo de elasticidade para o concreto 100RCC se comparado ao concreto de referência. Cabral (2008) justifica menores valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado reciclado à medida que estes apresentam um elevado teor de argamassa (40%), sendo este decorrente da argamassa aderida às partículas do agregado.

### 6.3.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios foram realizados nos concretos na idade de 28 dias. A Tabela 33 apresenta os valores médios obtidos para essas propriedades.

Tabela 33 - Absorção de água por imersão, índice de vazios (I.V) dos concretos

Concretos	Absorção (%)		I.V. (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
REF	4,4	0,21	10,2	0,03
30RCC	6,0	0,30	14,0	0,04
50RCC	6,4	0,15	15,1	0,10
70RCC	5,2	0,11	12,6	0,09
100RCC	7,7	0,07	17,3	0,19

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se depreender que todos os traços com incorporação de agregado reciclado apresentaram absorção de água superior ao concreto de referência, ou seja, a utilização do agregado reciclado gerou um aumento na absorção de água dos concretos. Na Figura 28 e na Figura 29 estão representados, respectivamente, os valores obtidos no ensaio de absorção de água e índice de vazios para os traços de concreto analisados.

Figura 28 - Absorção de água por imersão dos concretos analisados

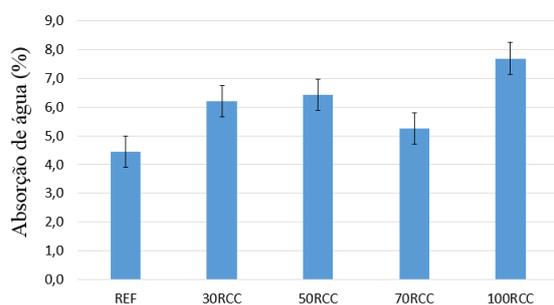
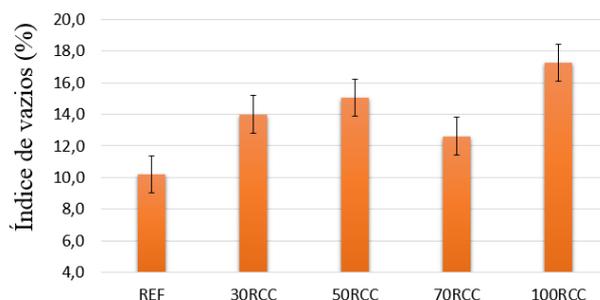


Figura 29 - Índice de Vazios (%) dos concretos analisados



O concreto com 100% de RCC apresentou maior porcentagem de absorção de água por imersão em relação aos demais traços de concreto, o que pode ser justificado devido à maior quantidade de agregado reciclado, que tem maior porosidade do que o agregado natural. Observa-se um comportamento não-linear para este parâmetro para os traços de

concreto, como pode ser observado para o traço de 50RCC e 70RCC, que possivelmente pode ser atribuído a erros durante a realização do ensaio.

Esta tendência de aumento da absorção de água com o acréscimo do percentual de substituição do agregado reciclado também foi identificado nos estudos de Çakir (2012), que obteve percentuais de absorção de água 41%, 88%, 143% e 206% maiores em relação ao concreto referência, para os concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado reciclado, respectivamente.

No que se refere à absorção dos concretos analisados, pode-se dizer que, comparativamente com os valores obtidos por Moretti (2014), foram obtidos valores similares, sendo obtido percentuais de absorção de água que variaram de 5,0 (REF) a 6,7% (100RCC). Pequenas variações são justificadas pela diferente origem do agregado reciclado.

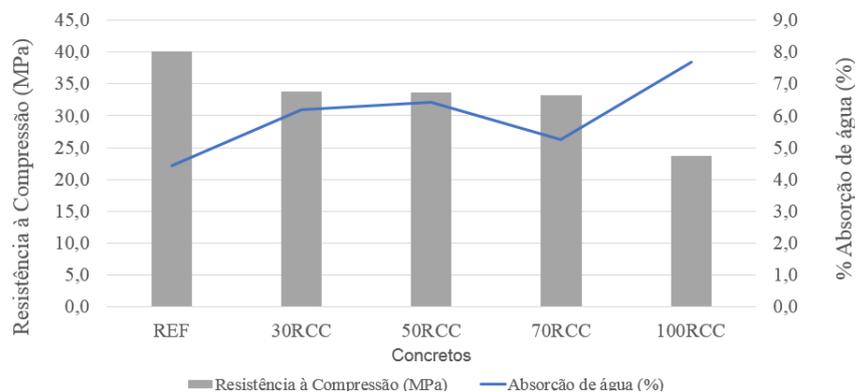
De acordo com Kumar e Dhinakaran (2012), esse aumento da absorção de água do concreto produzido com agregado reciclado ocorre devido à presença de argamassa aderida ao agregado reciclado. Os resultados obtidos corroboram com a afirmação de Gonçalves (2011), que afirma que a absorção de água do concreto reciclado é maior do que a do concreto natural, devido principalmente ao baixo valor do módulo de elasticidade dos agregados reciclados.

Os resultados obtidos para o percentual de índice de vazios apresentaram o mesmo padrão identificado para a absorção dos concretos, ou seja, para o traço 100RCC o índice de vazios apresentou um valor superior em relação aos demais, enquanto o concreto de referência apresentou menor índice de vazios. No estudo de Ângulo (2005) também foi identificado uma porosidade média maior do que o do concreto de referência objeto deste estudo, sendo que a porosidade média dos concretos produzidos com substituição integral do agregado natural pelo reciclado ficou no intervalo de 14,41% a 24,69%.

Os valores obtidos vão ao encontro do que afirma Leite (2001), que afirma que os traços com a incorporação de RCC apresentaram absorção superior ao concreto de referência, sendo que a autora concluiu, portanto, que a utilização do RCC provocou um aumento na absorção de água dos concretos. Isto pode ser atribuído à grande quantidade de vazios no agregado reciclado identificado através de análise microestrutural da estrutura interna do concreto com utilização do MEV e elétrons retroespalhados (LEITE, 2001).

Na Figura 30 encontra-se identificada a correlação entre os resultados de resistência à compressão e absorção de água, para os concretos REF, 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC, aos 28 dias.

Figura 30 – Relação entre a resistência à compressão e a absorção de água dos concretos REF, 30RCC, 50RCC, 70RCC e 100RCC



Através da análise da Figura 30 depreende-se que a resistência à compressão e a absorção de água dos concretos estão inversamente relacionados, ou seja, o concreto referência apresenta maior resistência à compressão (40,2 MPa) e o menor percentual de absorção de água (4,4%). Conforme há um aumento no percentual de substituição do agregado reciclado pelo natural, constata-se uma diminuição na resistência à compressão, acompanhada de um aumento do percentual de absorção de água. De acordo com Moretti (2014), quanto maior a porosidade da matriz cimentícia, menor a resistência do concreto, ou seja, essas propriedades apresentam uma relação inversa entre si.

Na Tabela 34 estão representados os valores de massa específica dos concretos produzidos.

Tabela 34- Massa específica seca, saturada e real dos concretos

Concretos	Massa específica seca	Massa específica saturada	Massa específica real
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
	Média	Média	Média
REF	2,30	2,40	2,56
30RCC	2,21	2,35	2,57
50RCC	2,21	2,35	2,58
70RCC	2,20	2,31	2,49
100RCC	2,09	2,25	2,50

No que se refere à massa específica real dos concretos, os valores variaram de 2,56 g/cm<sup>3</sup> para o concreto de referência e 2,469 g/cm<sup>3</sup> para o concreto 100RCC. A menor massa específica do concreto com incorporação de 100% de agregado reciclado pode ser atribuída a menor massa específica deste tipo de agregado se comparado com o agregado natural (brita basáltica). No estudo de Ângulo (2005) foi possível identificar que os valores de massa específica do concreto estão inversamente proporcionais à porosidade, ou seja, quanto

menor a densidade do agregado reciclado empregado na produção do concreto, maior a porosidade média do concreto.

De acordo com Levy e Helene (2004), quando o agregado natural for substituído na proporção de 20% por agregados reciclados de concreto ou de alvenaria de demolição, o concreto reciclado resultante provavelmente apresentará os mesmos valores para índice de vazios e porosidade do que o concreto de referência produzido com agregados naturais.

### 6.3.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é dependente do tamanho e da distribuição dos poros e da interconectividade entre estes.

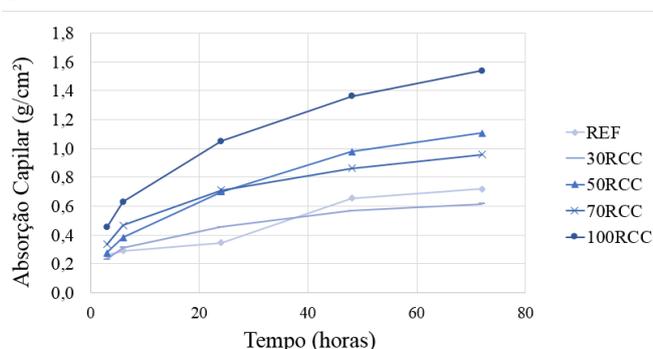
Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados na idade de 28 dias. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 35. Nesta tabela são apresentados os valores médios de absorção de água por capilaridade medidas após 3 h, 6h, 24h, 48h e 72h, além de ser representado também a altura média que a água atingiu nos corpos de prova.

Tabela 35 - Absorção de água por capilaridade

Concretos	Absorção por Capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )					h (cm)
	3h	6h	24h	48h	72h	
REF	0,258	0,290	0,347	0,656	0,718	5,5
30RCC	0,231	0,312	0,455	0,568	0,616	6,1
50RCC	0,276	0,384	0,699	0,912	1,106	6,9
70RCC	0,336	0,466	0,711	0,861	0,957	7,0
100RCC	0,454	0,630	1,051	1,361	1,538	8,5

Na Figura 31 foram apresentados os valores de absorção capilar dos concretos, ao longo do período do ensaio.

Figura 31 - Absorção por capilaridade dos concretos durante o período do ensaio

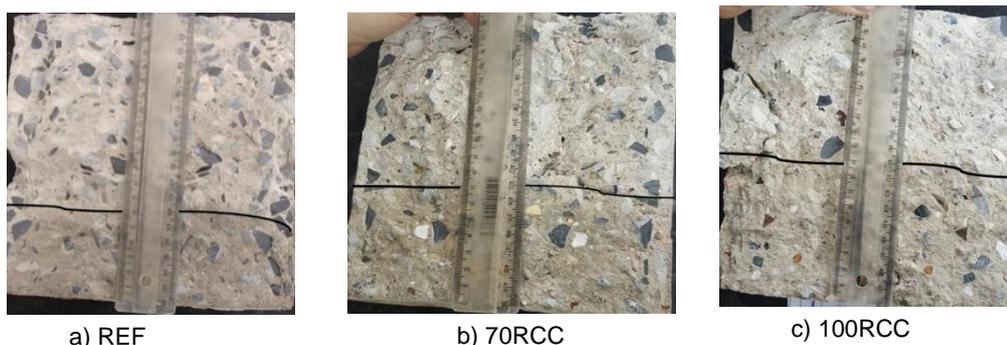


Os dados obtidos neste trabalho apontam para um aumento de absorção de água dos concretos com agregado reciclado em relação ao concreto de referência. Enquanto que o concreto referência apresentou uma absorção total de  $0,718 \text{ g/cm}^2$ , nos traços 70RCC e 100RCC a absorção de água ficou em  $0,957 \text{ g/cm}^2$  e  $1,538 \text{ g/cm}^2$ , após 72 horas de imersão na lâmina de água. Além disso, vale ressaltar que foi identificada a mesma altura de água nas bordas e no centro, para todos os concretos analisados, além do concreto 100RCC apresentar uma maior altura capilar em relação aos traços. O valor obtido por Souza (2013), para o traço 50RCC, foi similar ao resultado obtido neste estudo, sendo identificada uma variação de cerca de 10% ( $1,22 \text{ g/cm}^2$ ).

Gomes e Brito (2009) concluíram em sua pesquisa que a absorção de água por capilaridade apontou claramente um aumento no coeficiente correspondente ao percentual de substituição, independentemente do tipo de agregado reciclado. Silva (2017) também identificou um aumento do coeficiente de absorção capilar com o incremento do percentual de substituição do agregado reciclado, obtendo valores de 0,14 e  $0,158 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$  para os concretos com 50% e 100% de agregado reciclado, para uma relação a/c de 0,55, o que constitui um aumento de cerca de 10% ao se dobrar a quantidade de material reciclado no concreto.

Na Figura 32 encontra-se identificadas as alturas capilares dos traços REF, 70RCC e 100RCC.

Figura 32 – Alturas capilares dos traços



Esse aumento nas alturas capilares é possível de ser identificado visualmente, conforme Figura 32.

### 6.3.6 Resistividade elétrica

Nesta pesquisa foram realizados ensaio de resistividade elétrica volumétrica ou uniaxial, aos 28, 63 e 114 dias. Na Tabela 36 e na Figura 33 estão representados os valores médios de resistividade elétrica volumétrica obtidos, respectivamente.

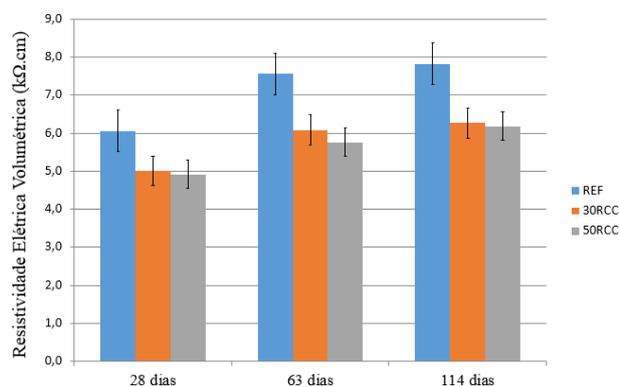
Tabela 36 – Resistividade elétrica volumétrica obtida pelo método dos dois eletrodos

Concretos	Resistividade elétrica (kΩ.cm)								
	28 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>	63 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>	114 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>
REF	6,1	0,2	3,0	7,6	0,2	2,7	7,8	0,1	0,9
30RCC	5,0	0,1	2,9	6,1	0,3	4,6	6,3	0,2	2,7
50RCC	4,9	0,2	3,6	5,8	0,3	5,1	6,2	0,2	2,6

<sup>(1)</sup> Desvio Padrão

<sup>(2)</sup> Coeficiente de Variação

Figura 33 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica dos concretos REF, 30% RCC e 50% RCC aos 28 dias, 63 dias e 114 dias



Na Tabela 37 está representada a classificação dos concretos analisados, quanto à penetração de íons cloreto, pela AASHTO TP 119-15.

Tabela 37 – Classificação dos concretos quanto à penetração de íons cloreto, para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, de acordo com a idade

Concreto	Classificação AASHTO TP 119-15		
	28 d	63 d	114 d
REF	Moderado	Moderado	Moderado
30RCC	Alto	Moderado	Moderado
50RCC	Alto	Moderado	Moderado

O concreto referência apresentou resistividade superior aos traços em que foram feitas substituição de agregado reciclado. Consta-se também que quanto maior o teor de substituição do agregado grão natural pelo agregado grão reciclado, maior é a condutividade elétrica do concreto e, conseqüentemente, a sua resistividade elétrica é menor. Foi identificada uma redução da resistividade elétrica de até 20% para o traço 30RCC, e de até 24% para o traço 50RCC, em comparação ao traço de referência. Apesar de, inicialmente, o concreto com incorporação de agregado reciclado ser classificado como “alto”, quanto à penetração dos íons cloreto, com o avanço do processo de hidratação do cimento, aos 63 e 114 dias todos traços analisados (REF, 30RCC e 50RCC) foram

classificados como “moderados”. Isso significa que os traços 30RCC e 50RCC apresentam um desempenho adequado, que pode ser equiparado ao concreto referência.

Isso pode ser atribuído ao aumento da porosidade do material agregado reciclado, que conseqüentemente irá apresentar maior quantidade de solução eletrolítica nos poros do concreto. A substituição do agregado reciclado influencia na microestrutura do concreto (SANTOS, 2006; HIGUERA *et al.*, 2013).

Além disso, os valores indicam que ocorreu um aumento da resistividade do concreto com o avanço da idade, devido ao processo de hidratação do concreto. Durante o processo de hidratação do cimento os compostos formados passam a preencher, de forma progressiva, parte dos vazios inicialmente ocupados pelo eletrólito e, portanto, há uma alteração da estrutura de poros da matriz cimentícia, o que irá aumentar a resistividade do material.

Constatou-se um aumento de 29%, 25% e 26% para os concretos REF, 30RCC e 50RCC, se comparado os valores obtidos aos 114 dias com aqueles aferidos aos 28 dias de idade. De fato, nos estudos desenvolvidos por Noort *et al.* (2016) os resultados mostraram que também ocorreu realmente um aumento da resistividade com o aumento da idade, para todos os concretos analisados.

Na Tabela 38 e Figura 34 encontram-se identificados os resultados obtidos para o ensaio de resistividade elétrica superficial, aos 28, 63 e 114 dias.

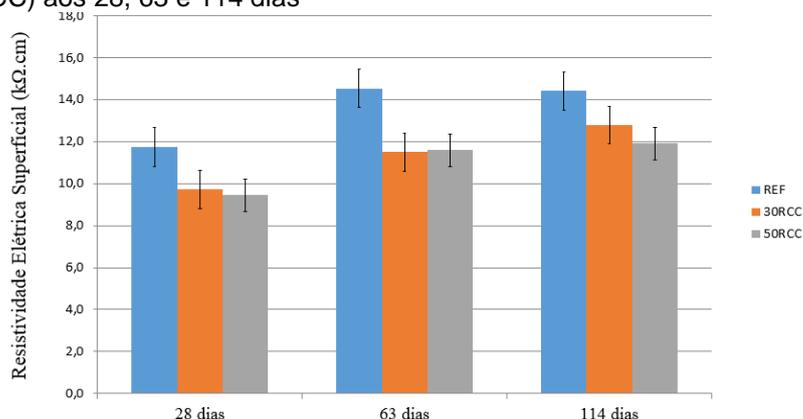
Tabela 38 – Resistividade elétrica superficial obtida pelo método da Sonda Wenner

Concretos	Resistividade elétrica (kΩ.cm)								
	28 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>	63 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>	114 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV(%) <sup>(2)</sup>
REF	11,7	0,4	3,0	14,5	0,3	1,9	14,4	0,7	4,7
30RCC	9,7	0,3	2,9	11,5	0,3	2,2	12,8	0,5	3,7
50RCC	9,5	0,4	4,6	11,6	0,3	2,2	11,9	0,5	4,3

<sup>(1)</sup> Desvio Padrão

<sup>(2)</sup> Coeficiente de Variação

Figura 34 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial dos concretos por traço (REF, 30% RCC e 50% RCC) aos 28, 63 e 114 dias



No ensaio de resistividade elétrica superficial também foi identificada uma redução da resistividade elétrica dos concretos com agregado reciclado em relação ao concreto convencional. Para o traço 50RCC essa redução foi de cerca de 25%, em relação ao concreto de referência e, para o traço 30RCC constatou-se uma redução ainda maior, de até 27%. Os percentuais de redução foram pequenos, se comparado com os resultados obtidos no estudo de Medina *et al.* (2016), que obteve valores de resistividade elétrica da ordem de 17% e 31% menores, para os traços com 20% e 25%, respectivamente, em relação ao concreto referência.

Os valores obtidos neste estudo também foram superiores aos obtidos por Singh e Singh (2016), cujos resultados para o ensaio de resistividade elétrica superficial variaram de 5,7(100% RCC) a 11,2 (REF) kΩ.cm, aos 28 dias. Os autores afirmam que os resultados obtidos são bastante influenciados pela natureza e qualidade dos agregados, posto que estão relacionados com o nível de saturação da solução nos poros do concreto.

Na Tabela 39 encontra-se a classificação dos concretos analisados, de acordo com a penetração de íons cloreto e risco de corrosão, relacionados para o ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos.

Tabela 39 - Classificação dos concretos quanto à penetração de íons cloreto e risco de corrosão, para o ensaio de resistividade elétrica superficial, de acordo com a idade

Concreto	Penetração de Íons Cloreto			Risco de Corrosão					
	AASHTO TP 119-15			COST 509			CEB 192		
	28 d	63 d	114 d	28 d	63 d	114 d	28 d	63 d	114 d
REF	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado	Moderado	Baixo	Baixo	Baixo
30RCC	Moderado	Baixo	Baixo	Alto	Moderado	Moderado	Alto	Baixo	Baixo
50RCC	Moderado	Baixo	Baixo	Alto	Moderado	Moderado	Alto	Baixo	Baixo

A fim de comprovar a adequabilidade dos valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica volumétrica e superficial, foi feita uma relação entre os valores obtidos nestes dois

ensaios. Foi obtido um fator de 1,94, ou seja, a resistividade elétrica superficial é quase o dobro da resistividade elétrica volumétrica, o que de fato é coerente, conforme definido por Spragg *et al.* (2015), considerando-se o fator geométrico e as peculiaridades do ensaio inerentes aos métodos de ensaio analisados.

Alguns autores, tais como Singh e Singh (2016) fazem uma correlação entre a resistência à compressão e os resultados de resistividade elétrica do concreto, e mencionam que estas propriedades estão diretamente relacionadas, sendo identificada uma redução tanto da resistência à compressão quanto da resistividade elétrica, para os concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado. Isso pode ser atribuído à porosidade e à existência tanto de micro quanto de macro poros no agregado reciclado, através do qual o deslocamento dos íons é facilitado.

Os valores obtidos neste estudo indicam que o emprego do agregado reciclado no concreto ocasiona uma redução da resistividade elétrica, que pode ser atribuído principalmente ao aumento da porosidade do concreto. Essa redução ocorre de forma mais acentuada quanto maior o percentual de substituição do agregado reciclado. Uma alternativa que pode ser empregada para minimizar este efeito seria a redução da relação a/c (KROPP; HILDORF, 2005; NOORT *et al.*, 2016) e o emprego de adições minerais, que irão atuar na conectividade e tamanho dos poros.

Beushausen (2015) somente ressalta que alguma variabilidade na resistividade elétrica pode ocorrer devido à heterogeneidade do concreto, localização e presença de agregados graúdos e, portanto, estes fatores devem ser levados em consideração ao analisar os resultados.

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto, sendo possível estabelecer uma correlação desta com o ingresso de íons cloreto (POLDER; PEELEN, 2002). Pode-se dizer que há um aumento da resistividade quando o concreto sofre carbonatação e há uma relação inversamente proporcional com a resistividade elétrica e coeficiente de difusão de cloretos posto que, em uma estrutura as zonas mais permeáveis apresentarão menor resistividade e maior penetração de cloretos. Quanto à corrosão, pode-se citar o estudo de Andrade (2004) que relaciona a resistividade à corrosão existente nas estruturas de concreto.

Os valores obtidos indicam que os concretos produzidos com agregado reciclado podem ser classificados como moderado, quanto à penetração de íons cloreto, de acordo com a classificação AASHTO TP 119-15 e, quanto ao risco de corrosão, são classificados como moderado, pelo normativo CEB-192 e baixo, pela COST 509.

### 6.3.7 Profundidade de penetração de íons cloreto

O ensaio de penetração de íons cloreto foi realizado aos 28, 63 e 91 dias para os traços REF, 30RCC e 50RCC. Na Tabela 40 e na Figura 35 estão representados os valores obtidos.

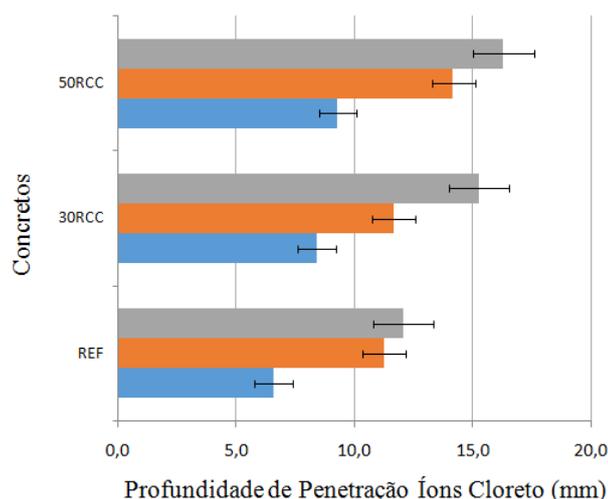
Tabela 40 – Frente de penetração de íons cloreto dos concretos expostos à solução de 3,5% de NaCl

Concreto	Frente de penetração (mm)								
	28 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>	63 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>	91 dias	DP <sup>(1)</sup>	CV (%) <sup>(2)</sup>
REF	6,5	0,4	5,4	11,2	0,6	5,5	12,1	0,4	3,0
30RCC	8,4	0,2	2,4	11,6	1,0	8,9	15,3	0,4	5,2
50RCC	9,3	0,5	5,2	14,2	0,5	3,3	16,3	0,6	3,6

<sup>(1)</sup> Desvio padrão

<sup>(2)</sup> Coeficiente de Variação

Figura 35 – Profundidade de penetração de cloretos nos concretos REF, 30RCC e 50RCC, aos 28, 63 e 91 dias, após exposição à solução de 3,5% NaCl



Através da análise dos dados é possível identificar a influência do agregado reciclado na frente de penetração de íons cloreto, sendo identificado que os concretos produzidos com esse material apresentam maior suscetibilidade ao transporte de agentes agressivos.

Esse efeito pode ser atribuído à maior porosidade do concreto produzido com agregado reciclado, para qualquer relação *a/c* (THOMAS *et al.*; 2013). Além disso, foi identificado um aumento do ingresso de íons cloreto com o aumento do percentual de agregado reciclado (LIMBACHYIA *et al.*; 2012; KURDA, BRITO, SILVESTRE; 2017).

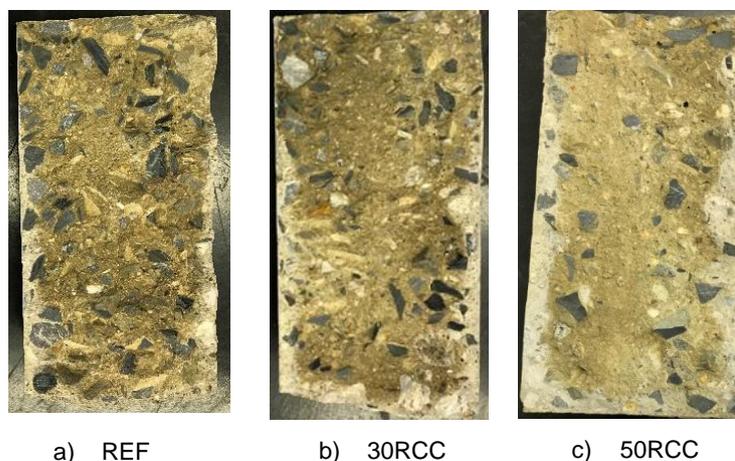
Wu e Xiao (2018) identificaram que outros fatores tais como o tamanho, formato do agregado reciclado e a espessura da zona de transição, constituída pela argamassa aderente às partículas do agregado reciclado, também influenciam consideravelmente a difusão dos íons cloreto no concreto com agregado reciclado.

O maior aumento, em termos percentuais, foi identificado aos 28 dias, sendo constatado um aumento de 28% e de 42% em relação ao concreto convencional, para os traços 30RCC e 50RCC. Esses resultados estão condizentes com os valores obtidos no estudo de Limbachiya *et al.* (2012), onde foi constatado um aumento de até 62% de íons cloreto para o concreto com 50% de substituição do agregado natural pelo reciclado (0,60% cloretos, em relação à massa de cimento), a uma profundidade de 5 a 10 mm a partir da superfície, se comparado ao concreto referência (0,37%) Essa tendência de redução da resistência à penetração de íons cloreto também foi identificado no estudo de Silva (2017), que também constatou menor penetração de cloretos, em relação ao concreto convencional.

Foi constatado também um aumento da profundidade de íons cloreto quanto maior o período de exposição das amostras aos ciclos de secagem e molhagem, conforme estudo de WU *et al.* (2016). Entre a idade de 91 e 28 dias, foi identificado um aumento da profundidade de íons cloreto de 84%, 82% e 76% para os traços REF, 30RCC e 50RCC.

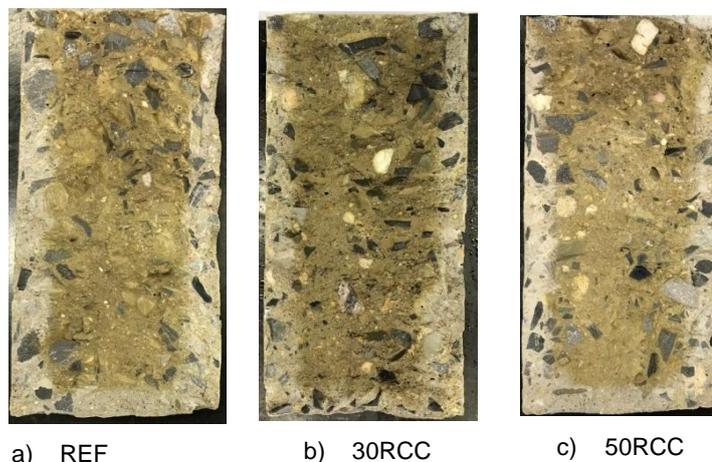
Na Figura 36 encontra-se representadas as frentes de penetração de cloretos para os traços REF, 30RCC e 50RCC, após aspersão da solução de nitrato de prata nos corpos de prova rompidos por resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias.

Figura 36 – Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após algumas horas de aspersão da solução de nitrato de prata, na idade de 28 dias



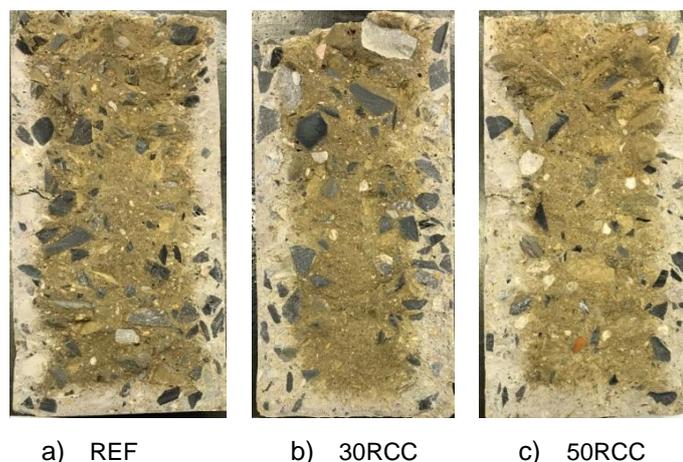
Na Figura 37 encontra-se representadas as frentes de penetração de cloretos para os traços REF, 30RCC e 50RCC, após aspersão da solução de nitrato de prata nos corpos de prova rompidos por resistência à tração por compressão diametral, aos 63 dias.

Figura 37 - Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após algumas horas de aspersão da solução de nitrato de prata, na idade de 63 dias



Na Figura 38 encontra-se representadas as frentes de penetração de cloretos para os traços REF, 30RCC e 50RCC, após aspersão da solução de nitrato de prata nos corpos de prova rompidos por resistência à tração por compressão diametral, aos 91 dias.

Figura 38 - Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após algumas horas de aspersão da solução de nitrato de prata, na idade de 91 dias



Pensando na durabilidade dos concretos produzidos com agregado reciclado e, a partir dos valores obtidos para a porosidade e profundidade de penetração da água, Thomas *et al.* (2013) recomenda uma diminuição de 0,1 na relação  $a/c$  para os concretos produzidos com 100% de substituição do agregado reciclado. Além disso, Limbachiya *et al.* (2012) identificou que um percentual de até 30% de agregado reciclado no concreto não exerce efeito significativo no conteúdo de íons cloreto.

Uma alternativa para melhorar o desempenho dos concretos com agregado reciclado seria o emprego de adições minerais em substituição ao cimento, posto que esses materiais melhoram significativamente a resistência ao ingresso dos íons cloreto no concreto. Ocorre uma melhor interação da zona de transição do agregado reciclado com a pasta de cimento

contendo materiais pozolânicos, tais como cinza de casca de arroz e cinza volante, sendo obtidos resultados até mesmo superiores ao concreto convencional (LIMBACHIYA *et al.*; 2012; FEDUMENTI; 2013; KURDA, BRITO, SILVESTRE; 2017; WU, XIAO; 2018).

### **6.3.8 Profundidade de carbonatação**

A ação do CO<sub>2</sub> nos concretos com agregado reciclado é maior do que nos concretos com agregados naturais. Esse efeito pode ser atribuído à maior porosidade e à estrutura de poros mais conectados entre si, nos concretos com agregado reciclado (HIGUERA *et al.*, 2013). Outros fatores também exercem influência, reduzindo a resistência à carbonatação do concreto com agregado reciclado, tais como a maior absorção de água, maior percentual de substituição do agregado reciclado pelo agregado natural e menor tempo de processamento do agregado reciclado, que permanece com maior quantidade de argamassa aderida às partículas (SILVA *et al.*, 2015). Essa tendência pode ser identificada através da profundidade de carbonatação 30% maior para os concretos com incorporação do agregado reciclado (1,52 mm), se comparado com o concreto referência (1,16 mm). Essa tendência também é identificada quando se analisa os coeficientes de difusão dos concretos analisados, sendo obtido um valor de 4,19 mm/ano<sup>0,5</sup>, 5,45 mm/ano<sup>0,5</sup> e 5,49 mm/ano<sup>0,5</sup>, para o concreto referência, 30RCC e 50RCC, respectivamente.

Neste estudo não foi identificado o efeito que o aumento do percentual de agregado reciclado no concreto pode ocasionar (SILVA *et al.*, 2015), sendo que os traços 30RCC (1,51 mm) e 50RCC (1,52 mm) apresentaram valores praticamente idênticos.

Nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41 pode-se observar a profundidade de carbonatação para os concretos produzidos com diferentes teores de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado, após 28 dias de exposição na câmara de carbonatação, sendo apresentadas imagens ampliadas referentes a cada traço, para que fosse possível identificar a frente de carbonatação.

Figura 39 - Profundidade de carbonatação do traço REF, aos 28 dias

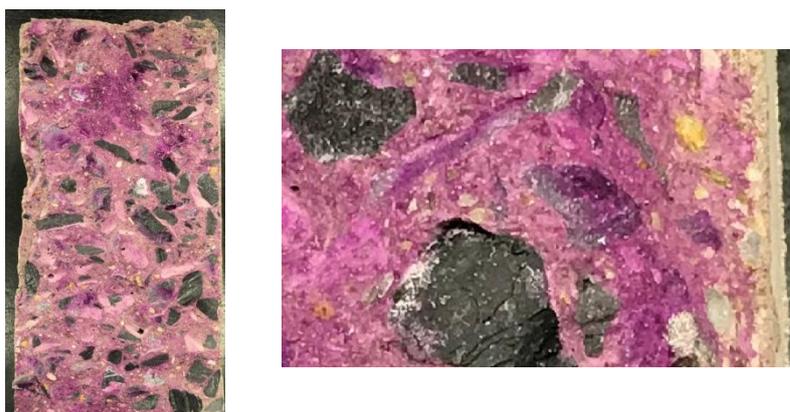


Figura 40 - Profundidade de carbonatação do traço 30RCC, aos 28 dias

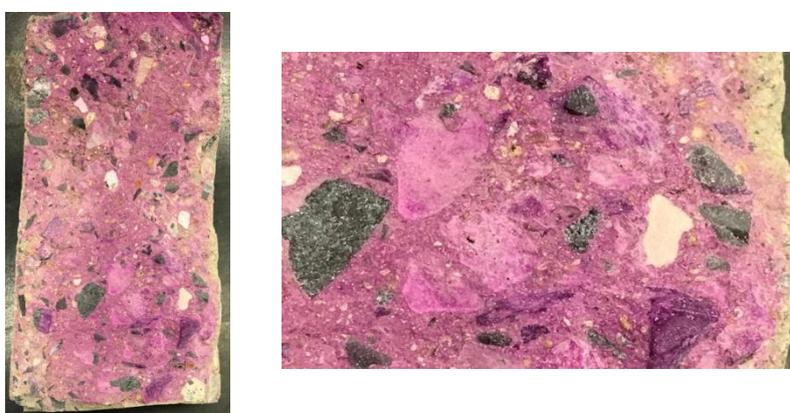
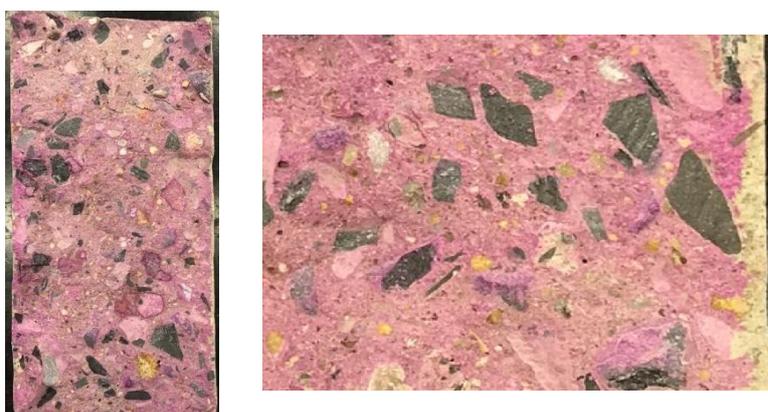


Figura 41 - Profundidade de carbonatação do traço 50RCC, aos 28 dias



Através da análise das Figura 39, Figura 40 e Figura 41 verifica-se que a ação do  $\text{CO}_2$  não ocorreu de forma intensa. De acordo com Ribeiro *et al.* (2014), nas medidas iniciais (até os 28 dias, geralmente) esse fenômeno não fica muito evidente sendo que, com maior tempo de exposição é possível identificar amostras quase que completamente carbonatadas.

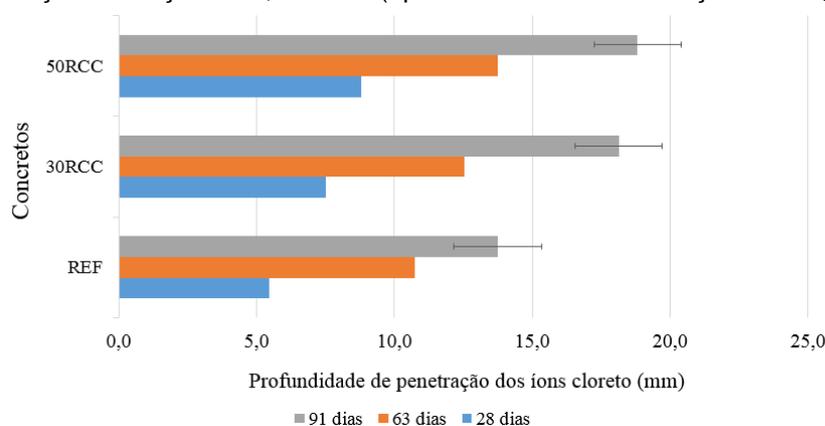
Uma alternativa que pode ser empregada de forma melhorar o desempenho de concretos produzidos com agregado reciclado poderia ser a adição de materiais pozolânicos, tais como sílica ativa, cinza volante entre outros, ao cimento Portland que, de acordo com Higuera *et al.* (2013) reduzem a porosidade do concreto e, no caso da cinza volante, obteve índices até mesmo superiores ao concreto produzido com cimento Portland. Além disso, Kurda *et al.* (2017) menciona que um percentual de até 30% de agregado reciclado não afeta significativamente a durabilidade do concreto, onde se inclui a carbonatação.

### 6.3.9 Ação combinada da carbonatação e íons cloretos

Na prática, as estruturas de concreto estão constantemente submetidas a diversos esforços solicitantes e simultaneamente afetados por diversos mecanismos de degradação, que provocam a deterioração da matéria. De acordo com WANG *et.al.* (2014, a corrosão de aço em estruturas de concreto armado é iniciada seja por carbonatação da espessura de cobrimento do concreto ou ingresso dos íons cloreto, os quais são conhecidos por despassivar o aço carbono e torná-lo suscetível à corrosão eletroquímica. O efeito sinérgico desses agentes agressivos pode modificar as propriedades do concreto: estrutura porosa, devido ao bloqueio físico gerado pela precipitação da calcita em decorrência da carbonatação, o que irá dificultar o ingresso dos íons cloreto; capacidade de ligação dos hidratos, com a liberação dos íons cloreto que anteriormente estavam combinados formando o sal de Friedel (YE *et al.*; 2016).

Na Figura 42 encontram-se representados os valores obtidos para o ensaio de profundidade de penetração dos íons cloreto, em mm, para os concretos estudados, nas idades de 28, 63 e 91 dias.

Figura 42 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos REF, 30RCC e 50RCC, aos 28, 63 e 91 dias, após exposição à solução de 3,5% NaCl(após ter sido submetido ação do CO<sub>2</sub>)



Na idade de 28 dias é possível identificar um aumento de 37% para o traço 30RCC (7,50 mm), em relação ao concreto referência (5,46 mm). Para o traço 50RCC identificou-se profundidades de ingresso dos íons cloreto ainda maiores, de 8,78 mm, o que representa um aumento de 67%, em relação ao traço REF.

Aos 63 dias, obteve-se o mesmo padrão, ou seja, o concreto referência apresentou menor frente de penetração de cloretos, se comparado aos demais concretos analisados. Os traços 30RCC e 50RCC apresentaram aumentos de 17% e 28%, respectivamente, se comparados ao concreto produzido somente com agregados naturais. Os valores obtidos foram maiores se comparados com os concretos submetidos somente à ação dos íons cloreto. De acordo com Wang *et al.* (2017) a carbonatação provoca um efeito prejudicial no transporte de íons cloreto, devido à redução do pH do concreto, o que irá afetar o fluxo de cloretos.

As maiores frentes de penetração de íons cloreto ocorreu aos 91 dias sendo que, o traço 50RCC apresentou uma profundidade média de 18,82 mm, quase atingindo a armadura, considerando-se uma espessura de cobrimento de 20 mm. Além disso, os valores obtidos para os traços 30RCC e 50RCC foram superiores aos obtidos no ensaio de profundidade de íons cloreto, considerando o efeito isolado do íon cloreto no concreto. Conforme apontado por Ye *et al.* (2016), a carbonatação induziria o deslocamento de íons cloreto das regiões carbonatadas a regiões não carbonatadas, sendo identificado pelo autor uma máxima concentração de cloretos na frente de carbonatação dos concretos. Isso seria um indício de que a carbonatação facilita o ingresso de íons cloreto no interior da estrutura de concreto, aumentando a frente de penetração de íons cloreto e intensificando a corrosão nas armaduras.

Além disso, é possível identificar um aumento na frente de penetração de cloretos, nas diversas idades analisadas. Esse aumento nas profundidades de penetração dos íons cloreto é maior nas primeiras idades, sendo identificado um aumento de 97%, 67% e 56% para o concreto referência, traço 30RCC e 50RCC, respectivamente, para as idades de 28 e 63 dias. Ao se comparar o avanço da frente de ingresso de íons cloreto para as idades de 63 e 91 dias, ocorreu um aumento percentual de 28%, 45% e 37% para o traço REF, 30RCC, 50RCC, respectivamente. Os valores obtidos vão ao encontro do que foi identificado na literatura, que afirma ocorrer um aumento na profundidade atingida pelos íons cloreto, com o aumento do número de ciclos de secagem e molhagem, independentemente do tipo de mistura, há um aumento na profundidade atingida pelos íons cloreto.

Nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45 encontram-se representadas as frentes de penetração de cloretos para os traços REF, 30RCC e 50RCC aos 28 dias, após as amostras terem sido submetidas à carbonatação acelerada por 28 dias. Para a identificação da fronteira que delimita a região do concreto onde ocorreu o ingresso de íons cloreto, aspergiu-se solução de nitrato de prata nos corpos de prova rompidos, aos 28, 63 e 91 dias.

Figura 43 - Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após carbonatação, na idade de 28 dias

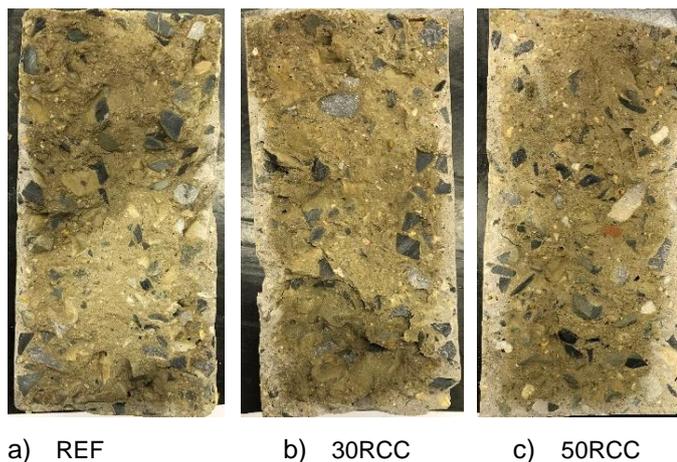


Figura 44 - Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após carbonatação, na idade de 63 dias

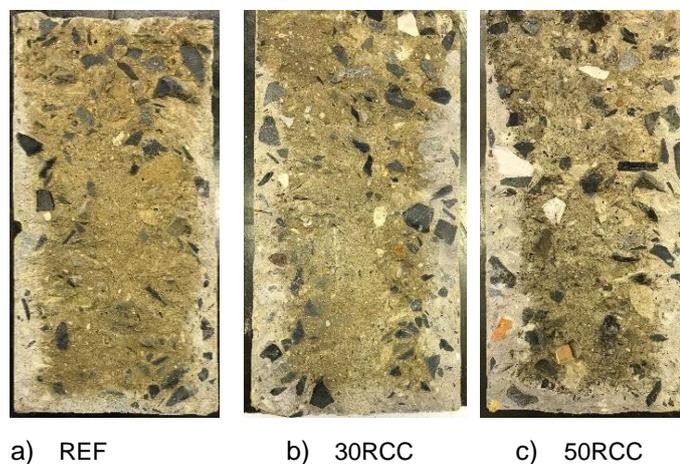
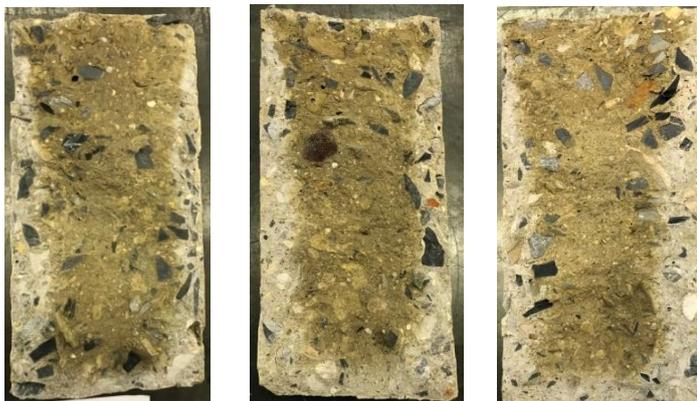


Figura 45 - Frente de penetração dos concretos REF, 30RCC e 50RCC após carbonatação, na idade de 91 dias



a) REF

b) 30RCC

c) 50RCC

Na Tabela 41 é apresentado um quadro com um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas e durabilidade.

Tabela 41 - Quadro Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas e durabilidade

Traço	Resistência à compressão (MPa) - (28 dias)	Resistência à tração por compressão diametral- (28 dias)	Módulo de elasticidade (GPa) – (28 dias)	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (28 dias)			Ascensão de água por capilaridade (cm) – (28 dias)	Resistividade elétrica (kΩ.cm) – (114 dias)		Profundidade de penetração de íons cloreto (mm) após 91 dias	Profundidade de carbonatação (mm) após 28 dias	Profundidade de íons cloreto, após carbonatação (mm) – (91 dias)
				Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Volumétrica	Superficial			
REF	40,2	3,9	39,9	4,4	10,2	2,56	5,5	7,82	14,4	12,06	1,16	13,74
30RCC	33,8	3,0	30,3	6,2	14,0	2,57	6,1	6,27	12,8	15,27	1,51	19,13
50RCC	33,6	2,9	29,6	6,4	15,1	2,58	6,9	6,18	11,9	16,29	1,52	18,82
70RCC	33,1	2,9	29,6	5,3	12,6	2,49	7,0	-	-	-	-	-
100RCC	23,6	2,3	23,2	7,7	17,3	2,50	8,5	-	-	-	-	-

## 7. CONCLUSÕES

De posse dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nesta pesquisa, a respeito do estudo de concretos com incorporação de agregado reciclado, frente às propriedades mecânicas e de durabilidade, é possível fazer as seguintes considerações:

- A incorporação do agregado reciclado na produção de concretos gera um decréscimo na resistência à compressão, comparado ao concreto de referência, de até 20% para os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC aos 28 dias. Isso pode ser atribuído à composição do RCC (maior porosidade) e à relação a/c empregada ao se considerar o adicional de água decorrente do emprego do agregado reciclado. Apesar de ter sido observado esse decréscimo, os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC apresentaram um desempenho adequado, quanto à resistência à compressão simples, ao se considerar tanto a relação a/c de 0,55, quanto para as relações a/c efetiva empregadas nos concretos com incorporação do agregado reciclado.
- A resistência à tração por compressão diametral também apresentou menores valores para os traços em que foi empregado o agregado reciclado, uma redução de 25% para os traços 30RCC, 50RCC e 70RCC, sendo que a porcentagem de redução em relação ao concreto de referência aumenta com o acréscimo de RCC no concreto.
- O módulo de elasticidade dos traços com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado apresentou valores menores em relação ao concreto referência, sendo identificado o mesmo padrão, em porcentagem, dos valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.
- A maior absorção de água e índice de vazios dos concretos em que foi substituído agregado natural por diferentes porcentagens de RCC pode ser justificada tanto pela maior porosidade do material agregado reciclado quanto do concreto com incorporação desse material, posto que, devido ao teor de água adicional considerada nesses traços, a matriz cimentícia do concreto com agregado reciclado pode ser considerada mais porosa do que no concreto convencional.
- O concreto referência apresentou menor absorção de água por capilaridade em relação aos demais traços estudados, conforme era esperado, uma vez que, ao se

utilizar o agregado reciclado, o concreto apresenta-se mais poroso em relação ao concreto com agregado natural.

- A resistividade elétrica está relacionada à capacidade de um material resistir à passagem da corrente elétrica, sendo esta transportada pelos íons dissolvidos nos poros. Como o concreto com incorporação de agregado reciclado apresenta maior índice de vazios em relação ao concreto convencional, os concretos analisados (30RCC e 50RCC) apresentaram menor resistividade elétrica comparado àqueles. No entanto, vale ressaltar que, com o avanço nas idades analisadas, na idade de 91 dias, com a hidratação progressiva do cimento, todos os traços analisados (REF, 30RCC, 50RCC) classificam-se como “baixo” em relação à penetração de íons cloreto (AASHTO TP 119-15) e, quanto ao risco de corrosão, foram classificados em “moderado”, pelo normativo COST 509 e “baixo” pela CEB 192.
- Quanto à profundidade de penetração dos íons cloreto, identificou-se um aumento do ingresso de íons cloreto no concreto produzido com agregado reciclado, tornando este material menos resistente à corrosão das armaduras. Isso se justifica à medida que, além da maior porosidade do concreto com substituição do agregado reciclado devido à composição do material (presença da argamassa aderida às partículas e presença de materiais cerâmicos), há ainda a questão da origem do agregado reciclado, sendo que este material pode conter íons cloreto. No entanto, a frente de penetração dos íons cloreto de todos os concretos analisados não atingiria a armadura, se considerarmos a espessura de cobertura mínima de 20 cm, conforme instruído na NBR 6118:2014.
- Em relação à carbonatação dos concretos, não foi possível identificar diferenças entre o concreto referência e os concretos com agregado reciclado, em função do tempo de exposição na câmara de carbonatação acelerada (28 dias).
- A análise combinada da carbonatação com os íons cloreto identificou que o processo de carbonatação influencia no ingresso de íons cloreto no concreto, sendo constatado maiores frentes de penetração de íons cloreto dos concretos. Isso simula o efeito sinérgico no qual as estruturas de concreto encontram-se submetidas.

Em geral, quanto às propriedades mecânicas, pode-se mencionar que o concreto 50% RCC e 70% RCC apresentaram resultados semelhantes no que se refere às propriedades mecânicas, o que significa que com a incorporação de RCC no concreto, até mesmo em

altos percentuais de substituição do agregado natural, não prejudica em demasia a resistência dos concretos analisados.

Quanto à durabilidade, pode-se dizer que, apesar de os concretos com incorporação de agregado reciclado apresentarem-se menos resistentes, quando submetidos à ação dos diversos agentes agressivos (íons cloreto e carbonatação), os concretos analisados apresentam um desempenho adequado. Deste modo, considerando-se os traços 30RCC e 50RCC, pode-se dizer que é viável o emprego do material concreto com agregado reciclado até mesmo com função estrutural, apesar de não existir norma brasileira que regulamente o emprego desse material.

De fato todo novo material a ser inserido no mercado deve apresentar desempenho adequado, atendendo às exigências dos normativos aplicáveis, além de cumprir com as diretrizes quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade, durante o período determinado em projeto. Ressalta-se ainda que devem ser analisadas as questões econômicas, verificando-se a viabilidade econômica do emprego desse material em ambientes agressivos.

## **7.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Futuros estudos deverão contemplar itens que não foram abordados nesta pesquisa e/ou que merecem maior aprofundamento. Dentre estes pode-se citar:

- ✓ Pesquisas que incorporem o emprego de adições minerais no concreto com agregados reciclados que, devido ao seu efeito físico e pozolânico promovam um refinamento dos poros e melhorem as propriedades do concreto com agregado reciclado.
- ✓ Estudos que avaliem o efeito combinado dos agentes agressivos no concreto por um período maior de exposição, como de fato ocorre o efeito sinérgico entre estes e como acontece a atuação destes no concreto com agregado reciclado. É necessário identificar como o material reage à ação combinada dos agentes agressivos.
- ✓ Estudos que identifiquem os custos de produção do concreto com agregado reciclado, a fim de identificar a viabilidade econômica do emprego desse material no setor da construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15114*: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15112*: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15113*: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15115*: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 10 p.

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. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 11579*: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15113*: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 18 p. 2012. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 248*: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, 2003. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5738*: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 09 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5739*: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. . Rio de Janeiro, 2007. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7222*: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 8522*: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9776*: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9833*: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 2008. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM43*: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 45*: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 65*: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 67*: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 08 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12655*: Concreto – Preparo, Controle e Recebimento. Rio de Janeiro, 2015. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p

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. 3 p

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *TP119-15*: Electrical Resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM G57-06* Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. Estados Unidos, 2012, 6 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1920-12:2015*. Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. Suíça, 2015, 17 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *BS EN 206:2013*. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Reino Unido, 2013, 93 p.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015*. São Paulo, 2015. 92 f.

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.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, setembro 2011. Dispõe sobre princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos e às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/253/publicacao/253\\_publicacao02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf)> Acesso em: 01 de jan. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. Departamento de Ambiente urbano. **Manejo de Resíduos Sólidos Urbano – Destaques da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2017. 8 p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/linha-do-tempo>>. Acesso em: dez/2017.

BRASIL, Prefeitura do Município de São Paulo. Secretaria Municipal de Serviços, Comitê Intersecretarial para a Política Municipal de Resíduos Sólidos. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo**. São Paulo, 2014. 456 p. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>>. Acesso em: abril/2018

ADASA. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Governo de Brasília (GDF). **Plano Distrital de Saneamento Básico e Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Tomo IV – Produto 2. Brasília, 2017. 658 p.

ABDULLA, N.A. Effect of recycled coarse aggregate type on concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27. P. 1-9. 2014.

AKBARNEZHAD, A.; ONG, K. C. G; ZHANG, M. H.; TAM, C. T. FOO, T. W. J. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3469-3479. 2011.

ANDRADE, J.J.O. *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*. 2001. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

ANGST, U.M. On the applicability of the Wenner method for resistivity measurements of concrete. *American Concrete Institute*, p. 661-672. 2014.

ÂNGULO, S.C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S.C. *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

AZZI, S. S.; COSTA; J. M. Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica de concreto em cimento Portland IV. *Construindo*, v. 9., nº 1, Belo Horizonte. 2017.

BAIRAGI, N.K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V.K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 9, p. 109-126, 1993.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. V. Assessment of the durability from its permeation process: A review. *Construction and Building Materials*, v. 15, p. 93-103, 2001.

BATTAGIN, I.L.S. Módulo de elasticidade do concreto – Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado. In: Concrete Show. 2008, São Paulo. *Anais*. São Paulo, 2008.

BAUER, L.A.F. *Materiais de Construção* – Volume 2. 2 ed. São Paulo: LTC. 1985. 342 p.

BAZUCO, R.S. *Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos*. 1999. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste use in concrete – A review breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, v. 68. p. 501-516. 2014.

BENETTI, J. K. *Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto*. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo 2012.

BERNDT, M. L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 2606-2613. 2009.

BEUSHAUSEN, H. Performance based specifications and control of concrete durability. *Rilem Report 230-PSC*. 2015. 359 p. 504-509, 2002.

BRAVO, M.; BRITO, J. EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 129-138. 2017.

BUYLE-BODIN, F.; ZAHARIEVA, H. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, v. 35, p.

BRAL, A.E.B. *Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD*. 2007. 209 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D.C.C.; RIBEIRO, J.L.D. *Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados*. IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto), v. 1, p. 171-192. 2008.

ÇAKIR, O. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 17-25. 2014

CENTURIONE, S. L.; BATTAGIN, A. F.; KIHARA, Y. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: XLVII Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa. *Anais*. João Pessoa, 2003.

CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios*. São Paulo: Signus, 1996, 2 v. 424 p.

CHANG, H.; UM, S.; XIE, D.; WANG, P. Influence of pore structure and moisture distribution on chloride “maximum phenomenon” in surface layer of specimens exposed to cyclic drying-wetting condition. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 16-30. 2017.

COELHO, A., BRITO, J. Economic analysis of conventional versus selective demolition: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55. p. 382-392. 2011.

COLLINS, R.J. Upgrading the use of recycled aggregates. *Studies in Environmental Science*, v. 71. p. 185-191. 1997.

CUI, H.Z.; SHI, X. MEMON, A.; XING, F.; TANG, W. Experimental Study on the influence of water absorption of recycled coarse aggregates on properties of the resulting concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.27. p. 1-9. 2014.

DOODS, W.; GOODIER, C.; CHRISTODOULOU, C.; AUSTIN, S.; DUNNE, D. Durability of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed aggregate on microstructure and water ingress. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 732-741. 2013.

ESTADOS UNIDOS. United States Environmental Protection Agency. *Indoor air pollution – Na introduction for health professionals*. EPA. Disponível em: <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-pollution-introduction-health-professionals>>. Acesso em: abril 2017.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, 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. p. 735-742. 2007.

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

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa Sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. *Ambiente Construído*, v. 10, p. 23-40. 2010.

FEDUMENTI, M. B. *Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto*. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2013.

FERREIRA, L., BRITO, J., BARRA, M. Influence of the pré-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the mechanical strength and durability of structural concrete. *Magazine of Concrete Research*. 42 p. 2011.

FLORES, C.Z. *Procedimento para especificação e compra de materiais da construção civil de menor impacto*. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

GOMES, M.; BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures*, v. 42, p. 663-675. 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 2069, p. 607-618.

GONÇALVEZ, R.D.C. *Agregados reciclados de resíduos de concreto: Um novo material para dosagens estruturais*. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GRAF, H.F. *Tramitância térmica e energia incorporada na arquitetura: Sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a NBR 12721*. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GRIGOLI, A. S. O uso de entulho de obra na própria obra como parâmetro de organização de canteiro e redução de custos. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002, Foz do Iguaçu/PR.

HANSEN, T. Recycling of demolished concrete and masonry. *Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete*. Londres: Spon Press, 1992. 306 p.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. 3ª ed. São Paulo: Pini, 1993.349 p.

HENRICHSEN, A., JENSEN, B.C. Styrkeegenskaber for beton medgenanvendelses materialer. *Miljøstyrelsen*. 1989. 98 p.

HEWLETT, P.C. *Lea's Chemistry of cement and concrete*. 4 ed. Reino Unido: Elsevier, 1998. 1035 p.

HIGUERA, R.C.; ARREDONDO, S.; ALMARAL, J.; GÓMEZ J. Chloride corrosion of embedded reinforced steel on concrete elaborated from recycled coarse aggregates and supplementary cement materials. *Revista Ingeniería de Construcción - RIC*, v. 28, p. 21 - 35, 2013.

ISAIA, G.C. *Concreto, Ciência e Tecnologia*. 2 Volumes. 1º Ed. São Paulo: IBRACON. 2011. 1968 p.

JOHN, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JUAN, M.S., GUTIERREZ, P.A. Study on the influence of attached mortar content on properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23. p. 872-877. 2009.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33. p. 703-711. 2003.

KHALAF, F.M.; DEVENNY, A.S. Recycling of demolished masonry Rubble as coarse aggregate in concrete: Review. In: *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16. p. 331-340. 2004.

KOULORIS, A.; LIMBACHIYA, M. C.; FRIED, A. N.; ROBERTS, J. J. Use of recycled aggregate in concrete application: Case studies. *Sustainable Waste Management and Demolition Waste*, ICE Virtual Library, 2015.

KROPP, J.; HILSDORF, H.K. Performance Criteria for Concrete Durability. *Rilem Report 12*. London Press: H.K. Hilsdorf. *Sustainable Waste Management and Recycling: Construction and Demolition waste*, ICE Virtual Library, 2015.

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J.D. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties. *Construction and Building Materials*, v. 157. p. 554-572. 2017.

KUMAR, P.S., DHINAKARAN, G. Effect of admixed recycled aggregate concrete on properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24. p.494-498. 2012.

LAYSSE, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A. R.; SALEHI, M. Electrical resistivity of concrete. *Concrete International*. American Concrete Institute. 2015

LEITE, M.B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S.M. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I: Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53. p. 36-44. 2008.

LIMA, J.A.R. *Proposição de diretrizes para normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

LIMBACHIYA, M., MEDDAH, M. S., OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, v. 27. p. 439-449. 2012.

LIU, Z. QIU, Q.; CHEN, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y.; MA, Y. Quantitative study on MCI rehabilitating steel bars in chloride-contaminated concrete based on inhibition and transport behaviours. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28. 6 p. 2016.

LOTFI, A.; AL-FAYEZ, M. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, v. 95. p. 243-256. 2015.

LOVATO, P.S. *Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto*. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia) –Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, p. 101–109, 2013.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 218. 2008.

MEDEIROS, R.A.J. *Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil* – Corrosão das armaduras devido à penetração de cloreto. 2014. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Instituto tecnológico de Aeronáutica, São Bernardo do Campo, 2014.

MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; THOMAS, C.; POLANCO, J. A.; FRÍAS, M. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 480–486, 2016.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J. *Microestrutura, propriedades and materials*. 3 ed. Estados Unidos da América: Mcgraw Hill. 2014. 645 p.

MEHTA, P.K.; MERYMAN, H. Tools for reducing carbon emissions due to cement consumption. *Structure Magazine*, p. 11-15.

MIRANDA, L. F. R.; TORRES, L.; VOGT, V. BROCARD, F. L. M.; BARTOLI, H. Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. In: XVI Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído, v. 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MIRANDA, L.F.R., ÂNGULO, S.C., CARELI, E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. In: Ambiente Construído, v.0 n°1, 2009, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre, 2009, p. 57-71.

MONTGOMERY, D.G. Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. *ICE Virtual Library*. p. 287-297. 1998.

MOREIRA, L.H.H; FIGUEIREDO, A.D. Influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados no desempenho mecânico do concreto estrutura. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, v. 563, 20 p., 2010.

MORETTI, J.P. *Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos*. 2014. 158 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MOTA, A.C. *Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

MOVASSAGHI, R. *Durability of reinforced concrete incorporating recycled concrete as aggregate (RCA)*. 2006. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas em Engenharia Mecânica) – Universidade de Waterloo, Waterloo, Canadá, 2006.

NAWA, T. Recycling of concrete. 2010. Disponível em: < [http://www.eng.hokudai.ac.jp/COE-area/workshop/pdf/05feb4\\_nawa.pdf](http://www.eng.hokudai.ac.jp/COE-area/workshop/pdf/05feb4_nawa.pdf)>. Acesso em: abr/2018.

NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. 3 ed. Inglaterra: Longman Scientific & Technical. 2013. 731 p.

NEVILLE, A.M., BROOKS, J.J. *Tecnologia do Concreto*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman. 2013. 448 p.

NIRO, G.; DOLARA, E.; CAIRNS, R. Properties of hardened RAC for structural purposes. *ICE Essencial Engineering Knowledge*, p. 177-187, 1998.

NOGUEIRA, J.R.S. *Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto*. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

NOORT, R.V. Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative method. *Construction and Building Materials*, v. 115. p. 746-759. 2016.

OLORUNSOGO, F.T. PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, v. 32. p. 179-185. 2002.

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de cimento Portland*. 13 ed. São Paulo: Globo, 1995. 299 p.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, v. 15, p. 125-131. 2001.

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. *Cement and Concrete Composites*, c. 24, p. 427-435. 2002.

POON, C.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 50, p. 293-305, 2007.

POON, C.S., KOU, S.C. Enhancing the durability properties of concrete prepared with the coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 35. p. 69-76. 2012.

POSSAN, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. 2010. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, v. 42. p. 407-415. 2007.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 2472-2479. 2011.

RAO, M.C., BHATTACHARYYA, S.V.B. Influence of Field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, v. 44. p. 205-220. 2011.

REAL, L. V.; OLIVEIRA, D R. B.; SOARES, T.; MEDEIROS, M. H. F. Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação de penetração de cloretos em concreto: estado da arte. *Revista Alconpat: revista da Associação Latino americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção*, v. 5, número 2, p. 149-159. 2015

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z. ; HELENE, P. *Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria , Controle e Métodos de Análise*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

ROSA, A. R. O.; GONÇALVES, D. K. C.; OLIVEIRA, N. N. C. Avaliação da resistência à compressão do concreto usando raio x. *Construindo*, v. 6, Belo Horizonte. 2014.

ROVENTI, G.; BELLEZE, T.; CONTI, C. Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet-dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. *Cement and Concrete Research*, v. 65, p. 76-84. 2014.

SANTOS, A.; BRITO, J. Building deconstruction in Portugal: a case study. *In: Proceedings of Portugal SB07 Conference—sustainable construction, materials and practices—challenge of the industry for the new millennium, 2007, Portugal, Proceedings. Portugal*, p. 1059–66.

SANTOS, L. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. 2006. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Construction and Building Materials*, v. 73. P. 434-441. 2014.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ DE JUAN, M. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40. p. 1054-1065. 2013.

SILVA, F.G. *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. 2006. 236 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Área de Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, R.V., BRITO, J., DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, v. 65. p. 201-217. 2014.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; NEVES, R.; DHIR, R. Carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 62. P. 22-32. 2015.

SILVA, S.R.; ANDRADE, J.J. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 704-715. 2017

SILVA, G. A. O. *Avaliação da durabilidade de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)*. 2017. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Consumo mensal de cimento no ano de 2016. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/numeros\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp)>. Acesso em: abril 2017.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled aggregates and metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 121. .p. 400-409, 2016.

SPRAGG, R. P.; CASTRO, J.; NANTUNG, T.; PAREDES, M.; WEISS, J. Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. *Advances in Civil Engineering Materials*, v. 1, n° 1, 17 p.; 2012.

TAM, V. W.Y., TAM, C.M.,LE,K.N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pré-soaking approaches. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 50. p. 82-101, 2007.

TAM, W.Y.V.; GAO, X.F.; TAM, C.M.; CHAN, C.H. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 22. .p. 364-369, 2008.

TAVAKOLI, M., SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *ACI Materials Journal*, v. 93. p.182-190, 1996.

TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*. Londres: Academic Press. 1990. 491 p.

TENORIO, J. J. L.; GOMES, P. C. C.; RODRIGUES, C. C.; ALENCAR, T. F. F. Concreto produzido com agregados reciclados. *Ibracon Structures and Materials Journal*, v. 5, . 692-701, 2012.

THOMAS, C.; SÉTIEN, J.; POLANCO, J. A.; ALAEJOS, P.; JUAN, M. S. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40. .p. 154-1065, 2013.

ROLA, S. M.; VAZQUEZ, E. G.; BADEJO, L. F. C.; FONSECA, I. C. L.; FREITAS, M. A. V.; ROSA, L. P. Sustentabilidade das construções: Técnicas e tecnologias para eficiência energética e redução das emissões de GEES. In: XIV Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora. *Anais. Juiz de Fora*, 2012.

VERDERESI, T. B.; SOUZA, D. J.; RÉUS, G. C.; FERREIRA, I. R.; MEDEIROS, M. H. F. Estudo de caso de previsão de vida útil de pontes e viadutos da região de Curitiba pelo método da resistividade elétrica e do potencial de corrosão. In: 18° ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Foz do Iguaçu, Paraná. 2015.

XIAO J, LEI B, ZHANG C. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science China-Technological Sciences*. 2012; v. 55, p. 2609-2616. 2012.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHER, P. A. M. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 173-183. 2017.

WU, J.; LI, H.; WANG, Z.; LIU, J. Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 733-738. 2016.

WU, Y.; XIAO, J. Multiscale digital-image driven stochastic finite element modelling of chloride diffusion in recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 162, p. 239-252. 2018.

YEHIA, S.; HELAL, K.; ABUSHARKH, A.; ZAHER, A.; ISTAITIYEH, H. Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 9, n° 1, p. 219-232. 2015.

YING, J.; XIAO, J.; TAM, V. W. Y. On the variability of chloride diffusion in modelled recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22. .p. 364-369, 2008.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 25, p. 223-232, 2003.

ZEGA, C. J.; MAIO, A. A. Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, v. 23, p. 281-286. 2011.

ZHANG, J.; BIAN, F.; ZHANG, Y.; FANG, Z.; FU, C.; GUO, J. Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 402-413. 2018.