

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA**

**GIOVANNA FALZETTA RIZZO**

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM AGREGADOS  
RECICLADOS**

**CAMPINAS**

**2018**

**GIOVANNA FALZETTA RIZZO**

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

**PUC-Campinas**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada por Marluce Barbosa – CRB 8/7313  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

t363.7282 Rizzo, Giovanna Falzetta.  
P314p Durabilidade de concretos com agregados reciclados / Giovanna Falzetta Rizzo. - Campinas: PUC-Campinas, 2018.  
156 f.

Orientadora: Lia Lorena Pimentel.  
Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Inclui anexo e bibliografia.

1. Resíduos - Reaproveitamento. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Reciclagem - Indústria. 4. Materiais de construção - Durabilidade. 5. Permeabilidade. 6. Porosidade. I. Pimentel, Lia Lorena. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

CDD – 22.ed. t363.7282

**GIOVANNA FALZETTA RIZZO**

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM  
AGREGADOS RECICLADOS**

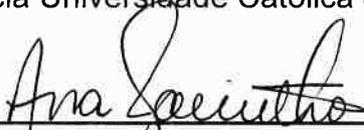
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel.

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2018 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



---

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Profa. Dra. Michelle Santos Rodrigues  
FATEC TATUAPE

## AGRADECIMENTOS

Para a realização de um trabalho existe muito mais do que uma pessoa, um projeto de pesquisa, um sonho, um objetivo. Por trás de todo trabalho existem diversas pessoas que contribuem querendo ou não, sabendo ou não, para a continuidade, para o seu andamento e a sua finalização.

Trabalhar com essas pessoas, faz com que a caminhada ao longo deste trabalho seja especial e marcante. Durante estes dois anos de empreitada só tenho a agradecer aquelas que contribuíram de alguma forma comigo e com o meu trabalho.

Em primeiro lugar, o agradecimento vai para aquela que tornou isto possível, que acreditou no meu trabalho, que buscou, lutou e batalhou comigo em todas as dificuldades e tropeços. Professora Lia Lorena Pimentel, sem você a execução deste trabalho não seria possível. Agradeço por cada sugestão, cada contribuição, cada questionamento, e acima de tudo, por nele acreditar.

Gostaria de agradecer à professora Dra. Mônica Pinto Barbosa, por acreditar no meu potencial, exigir sempre o melhor e apoiar acima de tudo esta aluna.

Às professoras Dras. Ana Elisabete P. G. A. Jacintho, Gladis Camarini, Michelle Santos Rodrigues e professor Dr. Antônio Ludovico Beraldo pela disponibilidade, atenção e contribuições.

Gostaria de agradecer aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas, Igor, Wesley e Joventino, por todo o apoio e paciência.

Ao Professor Dr. Omar Branquinho, pela disponibilidade, consultoria, apoio e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega e técnico de Laboratório de Meios, Olacir Tomasini, por toda a paciência, dedicação e pró-atividade.

Ao Prof. Dr. Adriano Bressane, pelo apoio e disponibilidade.

À minha amiga, Lilian Corpas, que insistiu, apoiou, forçou, estimulou e compreendeu cada passo tomado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos recursos disponibilizados através do projeto 2014/20486-8.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Obrigada a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento e acontecimento deste trabalho!

## DEDICATÓRIA

Deus abre portas em nossas vidas, cria oportunidades, e nos dá condições; porém, só uma pessoa é capaz de cruzar essas portas, abraçar essas oportunidades, e desenvolver todas as condições a quais são fornecidas: você.

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que foram criadas na minha vida para eu chegar até aqui.

Dedico este trabalho:

- Aos meus pais, pessoas incríveis que buscaram e buscam até hoje me tornar uma pessoa melhor. Duas pessoas que lutaram a vida inteira para garantir que as filhas conquistassem um estudo adequado, que buscassem sempre o conhecimento e o aprendizado. Agradeço por ter vocês ao meu lado, pelo apoio, dedicação, ensinamentos e por todo o amor.

- Ao meu marido Pedro Delmont. Obrigada por entender e estar sempre presente. Sem você nada disso seria possível. Obrigada por sempre estar ao meu lado, me apoiando acima de qualquer coisa; por cobrar mais de mim todos os dias; por acreditar no meu trabalho e por me forçar a ser sempre melhor.

- Às minhas irmãs, que buscaram ajudar e compreender cada passo dado

- À minha orientadora, Lia Pimentel. Agradeço por todas as horas dedicadas, por toda a paciência do mundo, por ter me escutado, me ajudado, me aconselhado; por muitas vezes não ter sido apenas uma orientadora, mas uma mãe, uma psicóloga e uma incrível amiga. Obrigada por todos os anos dedicados a me tornar uma pessoa melhor, uma aluna melhor e uma pesquisadora melhor. Cruzar esse caminho sem você ao meu lado não teria sido da mesma forma. Obrigada por tudo o que já fez, e faz por mim.

- À minha amiga Lilian Corpas. Obrigada por estar ao meu lado, acreditar no meu trabalho, por todo o apoio durante o curso de mestrado.

Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam aprender, compreender, desenvolver, ensinar e melhorar.

Obrigada!

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*Martin Luther King*

## RESUMO

RIZZO, Giovanna Falzetta. *Durabilidade de concretos com agregados reciclados*. 2018. 156f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

A construção civil é uma das indústrias que mais causam impacto ao meio ambiente. A extração desenfreada dos recursos naturais, a produção de cimento, a produção de concreto e a utilização dos seus componentes, além da geração imprudente dos resíduos de construção civil, materiais esses que muitas vezes são descartados como “entulho” afeta diretamente o meio ambiente, à sociedade e às cidades. Os resíduos de construção civil já são utilizados em muitos países da Europa como agregados reciclados para a mistura de concreto com fins estruturais. No Brasil, a sua utilização ainda é restrita a concretos sem função estrutural, devido à grande variabilidade do agregado reciclado, e o que elas influenciam nas características do concreto e em sua durabilidade. Devido à alta porosidade do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural, espera-se que o concreto produzido com o agregado reciclado apresente maior porosidade. E, conseqüentemente, fluídos e gases possuam maior facilidade em penetrar em seu interior, afetando diretamente a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado. Para que seja possível a ampliação no campo de consumo dos agregados reciclados, este trabalho tem como objetivo estudar os parâmetros que afetam a durabilidade, determinando e comparando através de ensaios laboratoriais as características físicas e mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado reciclado. Foram definidos quatro diferentes tipos de agregados graúdos para a realização deste trabalho, o natural (AN), o de concreto (ARCO), o cimentício (ARCI) e o cimentício tratado (ARCI Tratado) e dois teores de substituição do agregado natural pelos agregados reciclado: 20 e 30%. Os traços de concreto foram ensaiados para as idades de 7, 28, 90, 180 dias e após 180 dias de imersão em solução salina. Foram determinadas as características físicas e mecânicas dos concretos, além de ensaios de medição indireta da durabilidade, como a determinação da permeabilidade ao ar, penetração de íons cloreto, carbonatação e migração de íons cloreto. Os resultados obtidos demonstram que concreto utilizando o agregado reciclado de concreto (ARCO) produzido com 100% de concreto britado apresentou características similares ao concreto convencional, e que o aumento no teor de substituição de 20 para 30% não ocasionou perda significativa nas características do concreto. Quanto ao agregado cimentício (ARCI), os resultados obtidos para o traço com teor de substituição de 30% foram superiores daqueles com o traço produzido com o teor de substituição de 20%, e quando comparados ao concreto convencional os resultados apresentados para ambos os traços foram inferiores. Porém, para o teor de substituição de 30% mesmo os resultados sendo inferiores ao concreto convencional foi obtido um bom comportamento mecânico. Os concretos produzidos de agregado cimentício tratado (ARCI Tratado) não apresentaram melhor desempenho que os com agregado cimentício (ARCI) para a maioria das características avaliadas indicando que o tratamento proposto não foi adequado.

**Palavras chave:** Durabilidade, Resíduos de Construção, Permeabilidade, Porosidade.

## ABSTRACT

RIZZO, Giovanna Falzetta. *Durability of concrete with recycled aggregate*. 2018. 156p. Dissertação (Master's in Urban Infrastructure Systems) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

Civil construction is one of the industries that most impact the environment. The extraction of natural resources, the cement production, the concrete production and the use of its components, beyond the reckless generation of construction, materials that are often discarded as “rubble”, affects directly affect the environment, the society and cities. Construction waste is already used in many European countries as recycled aggregates for concrete mix with for structural purposes. In Brazil, its use is still restricted to concrete without structural function, because the characteristics of the recycled aggregates can increase the permeability of the concrete. Due to the high porosity of the recycled aggregate when compared to the natural ones, it is expected that the concrete produced with the recycled aggregate higher porosity and consequently, fluids and gases will be easier to penetrate inside, directly affecting the durability and the useful life of reinforced concrete structures. In order for recycled aggregates to be a possible substitute for natural aggregates in the concrete mix for structural purposes, this work aims to study the parameters that affect the durability, determining and comparing through laboratory tests the physical and mechanical characteristics of concrete produced with different types of recycled aggregate. Four different types of coarse aggregates were defined for the accomplishment of this work, natural (AN), concrete (ARCO), cement-based materials aggregate (ARCI) and treated cement-based materials aggregate and two levels of natural aggregate replacement by aggregates recycled, 20 and 30% were employed. The concretes were tested in the ages of 7, 28, 90, 180 days and after 180 days of immersion in saline solution. The physical and mechanical characteristics of the concretes were determined, as well as indirect measurements of durability, such determination of air permeability, chloride ion penetration, carbonation and migration of chloride ions. The results indicated that concrete using recycled concrete aggregate (ARCO) produced 100% of crushed concrete presented characteristics similar to conventional concrete, and that the increase in the substitution content of 20 to 30% did not cause significant loss in concrete characteristics. As for the cement-based materials aggregate (ARCI), the results obtained for concrete with 30% substitution content were higher than for the concrete produced with the substitution content of 20%, and when compared to the conventional concrete the results presented by both concretes were inferior. However, for the substitution content of 30% even the results being inferior to the conventional concrete it presented good mechanical behavior. The concretes produced with the treated cement-based materials aggregate (ARCI Treated) did not present better performance than those with cement-based materials aggregate (ARCI) for most of the characteristics evaluated indicating that the proposed treatment was not adequate.

**Key-words:** Durability, Construction Waste, Permeability, Porosity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Gestão de resíduos sólidos utilizada na Malásia. ....	8
<b>Figura 2</b> - Composição dos resíduos de construção civil. ....	9
<b>Figura 3</b> - Composição dos resíduos de construção civil em Shenzhen (China). .....	10
<b>Figura 4</b> - Porcentagem de consumo de agregado reciclado em relação ao total de agregado utilizado em diferentes países. ....	17
<b>Figura 5</b> - Representação gráfica do conceito de vida útil das estruturas. ....	22
<b>Figura 6</b> - Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e o desempenho das estruturas. ....	23
<b>Figura 7</b> - Representação da evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto. ....	24
<b>Figura 8</b> - Manifestações patológicas no concreto no estado de Pernambuco em 1997. ....	28
<b>Figura 9</b> - Fotografia do <i>Poroscope</i> . ....	35
<b>Figura 10</b> – Ensaio para determinação de permeabilidade superficial com o equipamento com o <i>Poroscope</i> . ....	36
<b>Figura 11</b> - Carbonatação do concreto com relação a/c de 0,5 – (a), (b), (c) 0% agregado reciclado e 20% de cinza volante nas idades de 45 dias, 75 e 165 dias, respectivamente; (d), (e), (f) 100% agregado reciclado e 20% de cinza volante nas idades de 45, 75 e 165 dias. ....	38
<b>Figura 12</b> - Ilustração do método de colorimetria de aplicação de nitrato de prata. ....	40
<b>Figura 13</b> - Esquema do teste ASTM C1202. ....	42
<b>Figura 14</b> - Arranjo experimental do ensaio de migração de cloretos. ....	43
<b>Figura 15</b> – Variação da concentração de íons cloreto na amostra com tempo de teste, sob tensão de 12 V. ....	45
<b>Figura 16</b> - Agregados graúdos utilizados. ....	50
<b>Figura 17</b> – Curva granulométrica – agregado miúdo. ....	52
<b>Figura 18</b> - Curva granulométrica - Agregados graúdos. ....	53
<b>Figura 19</b> - CPs expostos às intempéries: (a) Sol; (b) após a chuva; (c) fotografia do local exposto. ....	58

<b>Figura 20</b> - Fotografia dos corpos de prova imersos em solução salina (período de 180 dias). .....	59
<b>Figura 21</b> - Fotografia das amostras para ensaio de carbonatação. ....	61
<b>Figura 22</b> - Aparato para a realização das fotografias. ....	62
<b>Figura 23</b> – Fixação dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade. .	64
<b>Figura 24</b> - Esquema do corte do disco de concreto no corpo de prova. ....	65
<b>Figura 25</b> – Preparação das células para ensaio de migração: (a) corte dos tubos de PVC; (b) colagem dos tubos; (c) furos na tampa; (d) corte das amostras; (e) colagem da amostra no tubo; (f) amostra colada.....	65
<b>Figura 26</b> – Aparato para ensaio de migração de íons cloreto.....	66
<b>Figura 27</b> - Esquema utilizado para a coleta de dados. ....	67
<b>Figura 28</b> – Resultados da resistência à compressão axial – Análise 1.....	70
<b>Figura 29</b> – Resultados da resistência à compressão axial – Análise 1.....	72
<b>Figura 30</b> – Resultados do módulo de elasticidade – Análise 1.....	73
<b>Figura 31</b> – Resultados do módulo de elasticidade – Análise 1.....	73
<b>Figura 32</b> – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 2.....	75
<b>Figura 33</b> – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 2 .....	75
<b>Figura 34</b> - Resultados do módulo de elasticidade - Análise 2 .....	76
<b>Figura 35</b> – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 2.....	77
<b>Figura 36</b> – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 3.....	78
<b>Figura 37</b> – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 3.....	79
<b>Figura 38</b> – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 3.....	79
<b>Figura 39</b> – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 3.....	80
<b>Figura 40</b> - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 4. ....	81
<b>Figura 41</b> - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 4. ....	82
<b>Figura 42</b> - Resultados de módulo de elasticidade - Análise 4. ....	83
<b>Figura 43</b> - Resultados de módulo de elasticidade - Análise 4. ....	84
<b>Figura 44</b> - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 5. ....	85
<b>Figura 45</b> – Resultados de resistência à compressão axial - Análise 5.....	85
<b>Figura 46</b> - Resultados de módulo de elasticidade - Análise 5. ....	86
<b>Figura 47</b> – Resultados de módulo de elasticidade - Análise 5.....	87
<b>Figura 48</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por imersão – Análise 1. ....	90

<b>Figura 49</b> - Resultados da capacidade de absorção de água por imersão – Análise 1. ....	91
<b>Figura 50</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF. ....	92
<b>Figura 51</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCO. ....	92
<b>Figura 52</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCO. ....	93
<b>Figura 53</b> – Resultados da capacidade de absorção de água por imersão - Análise 2. ....	94
<b>Figura 54</b> - Resultados da capacidade absorção de água por imersão - Análise 2. ....	95
<b>Figura 55</b> – Resultados da Capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF. ....	95
<b>Figura 56</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCI. ....	96
<b>Figura 57</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCI. ....	96
<b>Figura 58</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 3. ....	97
<b>Figura 59</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 3. ....	98
<b>Figura 60</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF. ....	99
<b>Figura 61</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCI Tratado. ....	99
<b>Figura 62</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCI Tratado. ....	100
<b>Figura 63</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 4. ....	101
<b>Figura 64</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 4. ....	102
<b>Figura 65</b> - Coeficiente de capilaridade de 72 h. ....	103

<b>Figura 66</b> – Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 5. ....	104
<b>Figura 67</b> - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 5. ....	104
<b>Figura 68</b> – Coeficiente de capacidade de absorção de água por capilaridade para 72 h.....	105
<b>Figura 69</b> - Reta de calibração entre a concentração de cloretos (M) e a condutividade (mS/cm). ....	113
<b>Figura 70</b> – Monitoramento da corrente elétrica durante o ensaio de migração de íons cloreto. ....	114
<b>Figura 71</b> – Concentração de íons cloreto no compartimento anódico. ....	116
<b>Figura 72</b> - Resultados dos coeficientes de difusão no estado estacionário. .	117
<b>Figura A1</b> – Gráficos para determinação do traço referência.....	141

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> - Geração de RCD e respectiva reciclagem na Europa, em 2009. ....	6
<b>Tabela 2</b> - Composição dos agregados reciclados de Portugal. ....	13
<b>Tabela 3</b> - Características dos agregados reciclados para a utilização em concretos sem fins estruturais especificados pela NBR 15116 (ABNT, 2004). 16	
<b>Tabela 4</b> - Classes de agressividade ambiental.....	26
<b>Tabela 5</b> - Classificação do material quanto à permeabilidade. ....	35
<b>Tabela 6</b> - Permeabilidade de cloreto baseado na carga passante.....	41
<b>Tabela 7</b> - Características do cimento utilizado.....	49
<b>Tabela 8</b> - Procedimentos ABNT para caracterização dos agregados. ....	51
<b>Tabela 9</b> - Resultados das características do agregado miúdo.....	52
<b>Tabela 10</b> - Resultados das características dos agregados graúdos .....	54
<b>Tabela 11</b> - Definição dos traços. ....	55
<b>Tabela 12</b> – Traço unitário dos concretos em massa.....	55
<b>Tabela 13</b> - Delineamento experimental. ....	57
<b>Tabela 14</b> - Ensaios normatizados aplicados aos corpos de prova.....	59
<b>Tabela 15</b> - Característica do concreto no estado fresco. ....	69
<b>Tabela 16</b> - Resultados do ensaio de permeabilidade pelo equipamento <i>Poroscope</i> . ....	106
<b>Tabela 17</b> – Resultados da Carbonatação.....	107
<b>Tabela 18</b> - Estudo de imagens realizado para determinação da área de carbonatação. ....	108
<b>Tabela 19</b> - Resultados de penetração de íons cloreto. ....	110
<b>Tabela 20</b> - Estudo de imagens realizado para determinação da área de penetração de íons cloreto.....	111
<b>Tabela 21</b> - Picos de corrente obtidos através do ensaio de migração de íons cloreto.....	114

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARCI	Agregado Reciclado Cimentício
ARCO	Agregado Reciclado de Concreto
CDW	<i>Construction and Demolition Waste</i>
CP	Corpo de Prova
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
RA	<i>Recycled Aggregate</i>
RCA	<i>Recycled Concrete Aggregate</i>
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
ANOVA	Análise de Variância
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto

### SIGLAS RELATIVAS AOS TRAÇOS DE CONCRETO

#### SIGLAS

TREF	Traço Referência;
T 20 ARCO	Concreto com substituição de 20% agregado graúdo natural por agregado graúdo de concreto;
T 20 ARCI	Concreto com substituição de 20% agregado graúdo natural por agregado graúdo cimentício;
T 20 ARCI Tratado	Concreto com substituição de 20% agregado graúdo natural por agregado graúdo cimentício tratado;
T 30 ARCO	Concreto com substituição de 30% agregado graúdo natural por agregado graúdo de concreto;
T 30 ARCI	Concreto com substituição de 30% agregado graúdo natural por agregado graúdo cimentício;
T 30 ARCI Tratado	Concreto com substituição de 30% agregado graúdo natural por agregado graúdo cimentício tratado;

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objetivo .....	2
1.2	Justificativa do trabalho.....	2
1.3	Estrutura do trabalho .....	3
<b>2.</b>	<b>RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL</b> .....	<b>4</b>
2.1	Geração dos resíduos de construção civil.....	5
2.2	Classificação e composição dos resíduos de construção civil.....	8
<b>3.</b>	<b>AGREGADOS RECICLADOS</b> .....	<b>12</b>
3.1	Histórico.....	12
3.2	Classificação dos agregados reciclados .....	12
3.3	Características dos agregados reciclados.....	14
3.4	O agregado reciclado na produção de concreto com função estrutural ..	16
<b>4.</b>	<b>DURABILIDADE DO CONCRETO</b> .....	<b>19</b>
4.1	Conceitos de durabilidade.....	20
4.2	Classes de agressividade ambiental.....	25
4.3	Ataques à estrutura de concreto armado .....	27
4.3.1	Carbonatação .....	28
4.3.2	Penetração de íons cloreto .....	29
4.4	Mecanismos de transporte de gases e fluídos no interior do concreto ...	30
4.5	Avaliação da durabilidade por medição indireta .....	32
4.5.1	Capacidade de absorção de água por imersão e por capilaridade... 33	
4.5.2	Determinação da permeabilidade do concreto.....	34
4.5.3	Determinação da ocorrência de carbonatação.....	37
4.5.4	Determinação da presença de íons cloreto.....	39
4.5.5	Determinação da difusão de íons cloreto .....	40
<b>5.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
5.1	Caracterização do material .....	48
5.1.1.	Procedimento de produção do ARCI Tratado .....	50
5.1.2.	Caracterização dos agregados .....	51
5.2	Estudo de dosagem .....	54
5.3	Métodos de ensaio.....	56
5.3.1	Características no estado plástico .....	57
5.3.2.	Características no estado endurecido.....	57

5.3.2.1	Análise das características físicas e mecânicas do concreto no estado endurecido. ....	60
5.3.3.	Ensaio indireto para determinação da durabilidade dos concretos .	61
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>69</b>
6.1	Característica do concreto no estado fresco .....	69
6.2	Características mecânicas do concreto no estado endurecido.....	70
6.2.1	Análise 1 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCO <i>versus</i> T 30 ARCO; .....	70
6.2.2	Análise 2 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCI <i>versus</i> T 30 ARCI;.....	74
6.2.3	Análise 3 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCI Tratado <i>versus</i> T 30 ARCI Tratado;.....	77
6.2.4	Análise 4 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCO <i>versus</i> T 20 ARCI <i>versus</i> T 20 ARCI Tratado;.....	80
6.2.5	Análise 5 – T REF <i>versus</i> T 30 ARCO <i>versus</i> T 30 ARCI <i>versus</i> T 30 ARCI Tratado;.....	84
6.2.6.	Discussão dos resultados .....	87
<b>6.3</b>	<b>Ensaio de medição indireta da durabilidade</b> .....	<b>90</b>
6.3.1	Análise 1 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCO <i>versus</i> T 30 ARCO; .....	90
6.3.2	Análise 2 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCI <i>versus</i> T 30 ARCI;.....	93
6.3.3	Análise 3 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCI Tratado <i>versus</i> T 30 ARCI Tratado;.....	97
6.3.4	Análise 4 – T REF <i>versus</i> T 20 ARCO <i>versus</i> T 20 ARCI <i>versus</i> T 20 ARCI Tratado;.....	100
6.3.5	Análise 5 – T REF <i>versus</i> T 30 ARCO <i>versus</i> T 30 ARCI <i>versus</i> T 30 ARCI Tratado;.....	103
6.3.6	Permeabilidade ao ar .....	106
6.3.7	Carbonatação .....	107
6.3.8	Penetração de íons cloreto .....	110
6.3.9	Migração de íons cloreto.....	113
6.3.10	Discussão dos resultados .....	118
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>123</b>
<b>8.</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>126</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>127</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria da construção civil é uma das atividades humanas que mais afetam o meio ambiente. A utilização desenfreada dos recursos naturais não renováveis vem apresentando consequências devastadoras. Os componentes da mistura de concreto (areia e brita) encontram-se cada vez mais caros e mais distantes dos centros urbanos, dificultando a sua utilização. Além disso, a extração desses materiais impacta diretamente o meio ambiente.

Por outro lado, a produção do componente principal da mistura de concreto, o cimento, também gera impactos ambientais. Stafford *et al.* (2016) estudaram os impactos ambientais causados pela produção de cimento Portland como a depleção abiótica, a acidificação do meio, a eutrofização, a formação de oxidantes fotoquímicos e o aquecimento global. Segundo os autores, os principais impactos causados pela produção de cimento são a utilização de combustíveis fósseis, que quando queimados liberam gases prejudiciais ao meio ambiente, tais como o dióxido de carbono.

Além disso, outro problema ambiental gerado pelas atividades de construção civil é a geração de resíduos sólidos, que ocorre de forma excessiva e desenfreada, devido a problemas como, erros de projeto, erros de execução, mão de obra não qualificada, materiais de má qualidade, entre outros.

Os resíduos de construção civil, em sua maioria, são materiais quimicamente inertes, mas possuem como principal impacto o volume gerado. Além disso, grande parte desses resíduos de construção civil são descartados de maneira irregular (OMRANE *et al.*, 2017), podendo causar assoreamento de rios, entupimentos de galerias, além de potencial abrigo para animais peçonhentos, causando problemas de saúde pública.

Os resíduos de construção civil vêm sendo transformados em novos materiais como, por exemplo, os agregados reciclados que são reutilizados na própria construção civil, porém a sua utilização ainda é muito restrita considerando o volume gerado de RCD. Atualmente, no Brasil, a utilização dos agregados reciclados na mistura de concreto restringe-se a concretos que não tenham função estrutural, como aqueles empregados na produção de canaletas, blocos, entre outros, além da utilização em base e sub-base de pavimentação e coberturas primárias de vias.

Porém, em alguns países da Europa a utilização dos agregados reciclados na mistura de concreto com fins estruturais já é aceita embora com algumas restrições.

No Brasil, diversos estudos vêm sendo realizados para que esses resíduos de construção civil sejam utilizados como agregados reciclados na mistura de concreto com fins estruturais (TROIAN, 2010; MOREIRA, 2010; VERAS, 2012; PELISSARI e MIRANDA, 2016; MENDES, 2016).

Devido aos problemas citados anteriormente, e às pesquisas relativas aos impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, nota-se que há a necessidade de mudanças nos processos construtivos, com a utilização de novos materiais, e desenvolvimento de soluções para os problemas existentes e de pesquisas para que a indústria modifique seus procedimentos e se torne mais sustentável.

## **1.1 Objetivo**

Avaliar os parâmetros que afetam a durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

Determinar e comparar, através de ensaios laboratoriais, as características físicas e mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados reciclados.

## **1.2 Justificativa do trabalho**

A busca pela ampliação do campo de consumo dos resíduos de construção civil ocorre em todo o mundo. Diversos trabalhos apresentam resultados que comprovam que a utilização dos resíduos de construção civil como agregado reciclado para a mistura de concreto estrutural é viável com algumas restrições, já que estes apresentam características similares ao concreto convencional.

Porém, devido a algumas características dos agregados reciclados, como por exemplo, sua porosidade elevada, que influencia diretamente na permeabilidade do concreto, e conseqüentemente, em sua durabilidade, fazem-se necessários estudos que comprovem que os concretos que utilizam agregados reciclados em sua mistura apresentem parâmetros mínimos de qualidade e durabilidade.

Entender as características desses materiais e como eles podem modificar as características do concreto é extremamente necessário para que o campo de

consumo seja ampliado, e com isso, os resíduos de construção civil gerados sejam absorvidos e reutilizados pela própria indústria da construção civil.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está dividido em oito capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução deste trabalho, assim como o seu objetivo e a sua justificativa.

Após esse capítulo introdutório, o estado da arte será apresentado nos capítulos 2, 3 e 4.

O segundo capítulo trata dos resíduos de construção civil, sua classificação e geração. O terceiro capítulo discute os agregados reciclados no Brasil e no Mundo, iniciando pelo histórico do material, suas classificações, características e utilização para concretos com fins estruturais. E o último capítulo do estado da arte, ou seja, o quarto capítulo, adentra na durabilidade das estruturas, finalizando assim a revisão de literatura do presente trabalho.

O quinto capítulo é dedicado a metodologia aplicada a esse trabalho, englobando a caracterização dos materiais utilizados, o traço adotado, e o delineamento experimental.

O capítulo de número seis aponta os resultados e a discussão dos mesmos.

No capítulo sete será apresentada a conclusão desse trabalho, seguido das sugestões para trabalhos futuros.

E finalmente, o capítulo nove finaliza o presente trabalho com as referências bibliográficas.

## 2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Meyer em 2005 apontou que o concreto é o material mais importante, versátil e o mais utilizado na construção civil. O concreto é o segundo material mais consumido do mundo, perdendo apenas para a água (WBCSD, 2009).

Para a produção de todo esse volume de concreto, há a necessidade das matérias-primas: água, agregados, cimento e outros. Nota-se que pelos materiais utilizados para a produção do concreto, antes mesmo de sua geração, o meio ambiente é afetado devido à extração mineral em grandes quantidades.

O cimento que é o principal componente dessa mistura gera toneladas de dióxido de carbono lançados na atmosfera, além do consumo excessivo de energia para a sua produção (STAFFORD *et al.*, 2016).

O consumo de água é elevadíssimo, já que além da água utilizada para a mistura do concreto, há a necessidade de lavagem dos agregados, lavagem da betoneira e do caminhão, entre outras.

Por outro lado, McGinnis *et al.* (2017) afirmam que a produção dos agregados naturais é a que mais impacta o meio ambiente, já que para a mistura de concreto, cerca de 40 a 50% do seu volume total é de agregado natural, enquanto que apenas 10% representa o volume de cimento. Os agregados naturais estão se tornando cada vez mais escassos, e o seu consumo por ano e por pessoa gira em torno de 3 a 5 toneladas. Estima-se que no ano de 2030 o uso do agregado natural esteja entre 26 a 44 Gt por ano (DAMINELLI *et al.*, 2010 *apud* ECKERT e OLIVEIRA, 2016).

Como consequência, são produzidos nos Estados Unidos, Japão e Europa mais de 900 milhões de toneladas de resíduos de concreto, sem considerar países tais como a China, o maior produtor de cimento do mundo (WIMALA *et al.*, 2011). Apenas na União Européia são gerados de 320 a 380 milhões de toneladas por ano de resíduos de construção civil (PACHECO *et al.*, 2017 *apud* AFROUSHSABET *et al.*, 2017).

O crescimento da indústria da construção civil no Brasil e no mundo aumentou consideravelmente a geração de RCD, os quais geralmente são gerados de maneira inconsequente e depositados em locais irregulares (OMRANE *et al.*, 2017), e isso ocorre devido à falta de implantação e fiscalização das políticas públicas. Esses resíduos de construção acarretam diversos problemas às cidades, à população e ao meio ambiente.

Os resíduos de construção civil, classificados como Classe A pela Resolução nº 307:2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2002), são normalmente considerados como materiais inertes segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004b). Ou seja, são materiais que não apresentam reações físicas, químicas e biológicas, sendo o seu principal impacto o volume que é gerado (ABNT, 2004).

A preocupação com os resíduos gerados pela construção civil no Brasil, no geral, é relativamente recente. Porém, a reciclagem dos resíduos de construção civil vem da Antiguidade, e tem sido inclusive utilizada na reconstrução da Europa após a Segunda Guerra Mundial (JOHN; AGOPYAN, 2010).

O processo de reciclagem é de grande importância e impacta na proteção do meio ambiente (OMRANE *et al.*, 2017). A reutilização dos resíduos de construção não só diminuiria o consumo dos agregados naturais, mas também reduziria os custos com transporte, e conseqüentemente, a emissão de gases (OMRANE *et al.*, 2017 e AFROUGHSABET *et al.*, 2017).

Além disso, a reciclagem dos resíduos de construção civil, transformando-os em agregados reciclados para a utilização dentro da própria construção civil, foi considerado por Silva e De Brito (2014) como sendo um dos métodos mais eficientes para agregar valor a esses materiais, que são considerados sem valor e muitas vezes descartados como “lixo”.

## 2.1 Geração dos resíduos de construção civil

Para Llatas (2011), os RCD representam um terço dos resíduos sólidos gerados no mundo. Com isso, a indústria da construção civil contribui ativamente com os impactos causados ao meio ambiente.

Os resíduos de construção civil são identificados na União Europeia como prioridade para reutilização e reciclagem, já que esses representam aproximadamente 25 a 30% dos resíduos sólidos gerados. Porém, são estimados que 46% dos resíduos provenientes da construção civil, com variações significativas entre os países participantes da União Europeia, são reciclados e reutilizados. Espera-se que até 2020 pelo menos 70% desses resíduos gerados sejam reciclados e reutilizados na Europa (POULIKAKOS *et al.*, 2016).

A Tabela 1 apresenta a geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) em alguns países da Europa, e a porcentagem de reciclagem desses resíduos.

A quantidade de geração destes resíduos varia de acordo com o país, assim como a sua porcentagem de reciclagem.

**Tabela 1** - Geração de RCD e respectiva reciclagem na Europa, em 2009.

País	RCD (milhões de toneladas)	Reciclagem (%)
Dinamarca	5,27	94
Estônia	1,51	92
Finlândia	5,21	26
França	85,65	45
Alemanha	72,40	86
Grécia	11,04	5
Hungria	10,12	16
Inglaterra	99,10	75
Irlanda	2,54	80
Itália	46,31	0
Letônia	2,32	46
Lituânia	3,45	60
Luxemburgo	0,67	46
Malta	0,80	0
Holanda	23,90	98
Polônia	38,19	28
Portugal	11,42	5
Romênia	21,71	0
Eslováquia	5,38	0
Eslovênia	2,00	53
Espanha	31,34	14
Suécia	10,23	0

Fonte: EUROPEAN COMMISSION, 2011.

Wu *et al.* (2016) relatam que na China um bilhão de toneladas de resíduos de construção e demolição foram gerados no ano de 2014 e que apenas 5% desses resíduos foram reciclados.

Já no Brasil, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos Preliminar (BRASIL, 2011), os resíduos de construção civil podem representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos. Porém, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2016), o percentual de resíduos de construção civil dentro dos resíduos sólidos é variável, e de difícil determinação. A porcentagem varia de acordo com o município, dependendo das características das construções e do desenvolvimento econômico de cada região. Por exemplo, em

Salvador a porcentagem de resíduos de construção civil é de cerca de 41% dos resíduos sólidos, enquanto que em Ribeirão Preto é de 70%.

De acordo com o IBGE no ano de 2010 foram gerados no Brasil cerca de 100.000 t/dia de resíduos provenientes da construção civil. Já no ano de 2015, o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2015), aponta que foram gerados 123.000 t/dia, apresentando então um aumento na geração de RCD de 23% entre os anos de 2010 a 2015.

Segundo o relatório Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2016), uma das características da construção civil é o grande consumo de materiais e a geração dos resíduos de forma desenfreada, dificultando o controle e o gerenciamento. Segundo o SINDUSCON (2015) 70% dos resíduos de construção gerados são provenientes de pequenas construções.

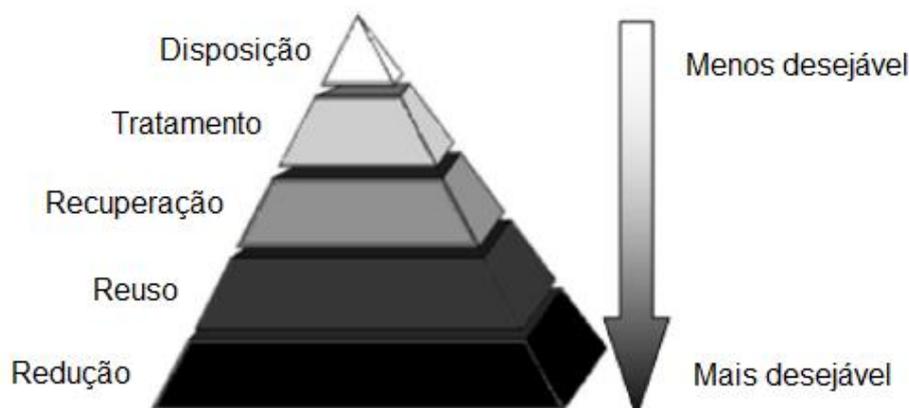
A construção civil deve modificar-se no Brasil e no mundo, assim como as políticas de geração, destinação, reciclagem e reutilização dos resíduos, que devem ser fiscalizadas e cumpridas. Grande parte dos resíduos são descartados como “lixo”, porém, poderiam se tornar novos materiais e serem reutilizados, dando assim uma destinação correta ao invés de serem depositados em aterros sanitários. Esse descarte inconsciente causa impacto direto ao meio ambiente e à sociedade.

O gerenciamento de resíduos de construção civil é regulado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e pela Resolução CONAMA nº 307, cabendo ao poder público municipal o controle e a fiscalização, tanto para os pequenos geradores quanto para os grandes (SÃO PAULO, 2016).

Moh e Manaf (2016) demonstram na Figura 1 como os resíduos sólidos são gerenciados na Malásia atualmente. A gestão dos resíduos sólidos implantada nesse país poderia servir de modelo de gestão a como deveria ser a gestão dos resíduos de construção civil no Brasil e no Mundo.

Como pode ser visto na Figura 1, a primeira opção é sempre a disposição desses resíduos, porém, a menos desejável. Para que seja atingido o cenário ideal, os resíduos sólidos devem ter sua geração reduzida, e após a diminuição da quantidade gerada, esses resíduos devem ser reutilizados, recuperados, tratados e por fim, dispostos, se não houver mais nenhuma opção. O cenário exemplificado se aplicaria à construção civil, que deve modificar-se e organizar-se para que a geração dos resíduos de construção civil diminua, e com isso, seja reduzido o impacto que a mesma gera para a sociedade e para o meio ambiente.

**Figura 1** - Gestão de resíduos sólidos utilizada na Malásia.



Fonte: adaptado do trabalho de MOH; MANAF (2016).

O modo mais efetivo de diminuir ou eliminar o problema com os RCD é a redução da geração de resíduos através da diminuição da perda de materiais, a reutilização, reciclagem (OZALP *et al.*, 2016). A maneira mais usual de reutilização destes resíduos de construção civil é a de utilizá-los como agregados reciclados.

O principal problema que está vinculado com a geração dos resíduos de construção civil é o volume que é gerado.

## 2.2 Classificação e composição dos resíduos de construção civil

Considerando a necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos provenientes da construção civil, a Resolução nº307:2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil (BRASIL, 2002).

Segundo a Resolução CONAMA 307, os resíduos de construção civil são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras. A mesma classifica os resíduos de construção civil como:

- Classe A: resíduos recicláveis ou reutilizáveis, como os agregados;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras utilizações, como plásticos, papel, metais, vidros, madeiras;

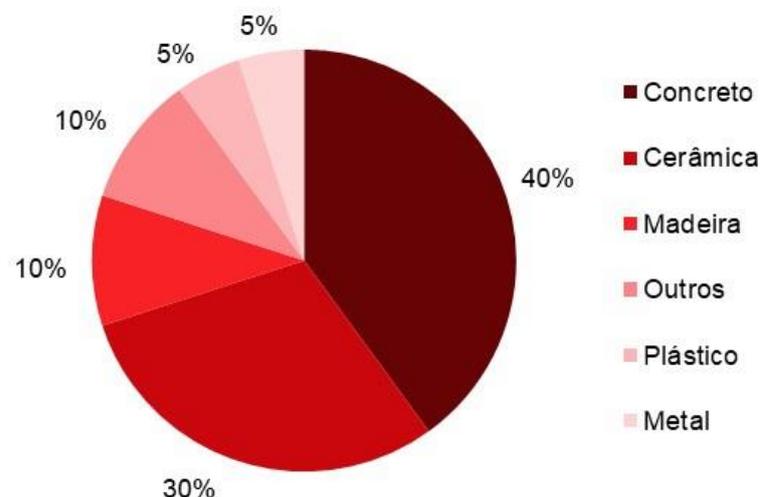
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou reutilização, tais como os produtos oriundos do gesso;

- Classe D: Resíduos perigosos oriundos de processo de construção, como tintas, solventes e óleos.

Os resíduos classificados como Classe A, ou seja, resíduos que podem ser recicláveis ou reutilizáveis como agregados reciclados são definidos segundo NBR 10004 (ABNT, 2004b) como resíduos inertes. Porém, segundo John e Agopyan (2010), em sua maioria, se fossem submetidos a análises provavelmente seriam classificados como não inertes, devido ao seu pH e dureza da água absorvida, podendo até conter contaminantes importantes.

A Figura 2 apresenta o resultado de um estudo realizado por Oikonomou (2005). O autor, através de estudos, estipulou a constituição dos resíduos de construção civil da Grécia, apresentando a porcentagem de cada componente encontrado nos resíduos de construção civil. Observa-se nesse trabalho que a maior parte do material é constituído de resíduos classificados como pertencentes à Classe A, sendo o concreto e a cerâmica os resíduos que podem ser reutilizados como agregados reciclados.

**Figura 2** - Composição dos resíduos de construção civil.

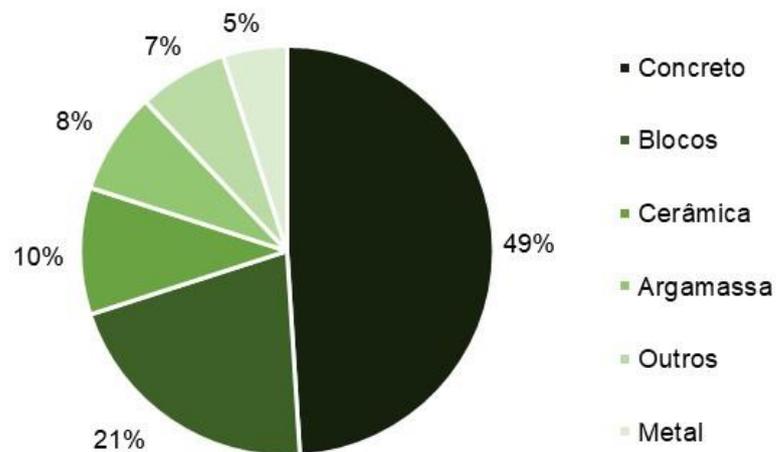


Fonte: adaptado do trabalho de OIKONOMOU (2005).

Outros autores apresentam resultados similares. Wu *et al.* (2016) apontam que na cidade de Shenzhen, na China, entre os anos de 2010 a 2015, foram gerados 13,6

milhões de toneladas de RCD e que cerca de 49% RCD são provenientes do concreto, seguido pelos tijolos/blocos e componentes cerâmicos que representam 21 e 10%, respectivamente. A Figura 3 apresenta a composição dos RCD em Shenzhen- China.

**Figura 3** - Composição dos resíduos de construção civil em Shenzhen (China).



Fonte: adaptado do trabalho de WU *et al.* (2016).

Nota-se que no caso de Shenzhen, metade dos RCD gerados é provenientes de resíduos de concreto.

Observa-se nos procedentes, que as porcentagens de resíduo de concreto se sobressaem aos demais materiais, seguida pelos materiais cerâmicos. Esses materiais são passíveis de serem britados e utilizados como agregados reciclados.

Segundo Oikonomou (2005), a composição dos resíduos de construção civil apresenta em sua maior fração 40% de resíduo de concreto, seguida por 30% de cerâmica. Por outro lado, no estudo em Shenzhen, realizado por Wu *et al.* (2016), 9 anos depois, apresenta-se composição de 49% de resíduo de concreto, seguido por 21% de blocos e 10% de cerâmica.

A diferença nas porcentagens da composição dos resíduos de construção civil pode ser explicada de diversas formas. Primeiramente, o intervalo de tempo decorrido entre a realização das pesquisas; em 9 anos a indústria da construção civil pode ter se modificado, diminuído a utilização de determinado material, e aumentado a utilização de outro. Outro ponto que pode ser justificado essa mudança na composição, é o local onde foram realizados os estudos; Oikonomou (2005) estipulou a composição dos resíduos na Grécia, enquanto que Wu *et al.* (2016) determinaram

a composição para uma cidade na China (Shenzhen), ou seja, os métodos construtivos podem ser diferentes dependendo da localidade e, conseqüentemente, a composição dos resíduos também será.

Muitas vezes, em uma mesma cidade, ou até mesmo em um período diferente, a composição apresentada do resíduo não será a mesma, já que o resíduo de construção depende diretamente do método construtivo que foi utilizado, do tipo de imóvel que foi construído ou reformado. Por isso, a determinação da composição dos resíduos de construção se faz tão difícil, pois a variabilidade apresentada por eles dificulta corretas determinações e a sua utilização.

A composição desses resíduos é difícil de ser determinada, já que é um material que depende das técnicas construtivas utilizadas, da região e do local onde foi gerado.

O Panorama dos Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (2016) afirma que a composição dos resíduos de construção é variável, dependendo diretamente dos materiais disponíveis na região, da tecnologia empregada nas construções e da mão de obra que esteja sendo utilizada, além do desenvolvimento econômico da região da construção.

### 3. AGREGADOS RECICLADOS

#### 3.1 Histórico

Acredita-se que a reciclagem e utilização dos resíduos de construção civil sejam temas de interesse atual, porém existem diversos estudos e relatos de que o reaproveitamento desses resíduos vem sendo realizado desde o Império Romano e a Grécia antiga (VERAS, 2012).

Para Veras (2012), a utilização dos RCD ganhou força após a Segunda Guerra Mundial na Alemanha. Miranda (2014) aponta que após o período de guerra, as cidades europeias estavam cobertas por escombros, e havia escassez de material para a produção de concreto para que as cidades fossem reconstruídas. Para a reconstrução das cidades, foi utilizado como matéria-prima os resíduos de construção civil como agregados reciclados para a produção em concreto armado.

Atualmente, a utilização de agregados reciclados para a mistura de concreto com função estrutural vem sendo estudada em vários países do mundo, e conforme as necessidades que os países apresentam, esses materiais são vistos e utilizados de diferentes maneiras. A ampliação no campo de consumo de utilização destes materiais só é possível através do desenvolvimento de contínuas pesquisas para desfazer os conceitos negativos da utilização dos resíduos de construção civil, de modo a comprovar todo o seu potencial (SUCIC e LOTFY, 2016).

#### 3.2 Classificação dos agregados reciclados

A utilização dos RCD como agregados reciclados para a mistura de concreto é realizada de diversas maneiras em todo o mundo, e isso se deve ao grau de necessidade que os países apresentam em utilizar ou não os RCD.

Cada vez mais os recursos naturais não renováveis tornam-se escassos, havendo necessidade de percorrer maiores distâncias para sua extração, aumentando o custo de sua extração e aumentando a emissão de gases poluentes com o transporte desses materiais. Além dos impactos ambientais causados pela extração e pela qualidade da matéria-prima, em alguns países os materiais naturais extraídos não apresentam boas características; as normas que regem a utilização desses resíduos como agregados reciclados são diversas e são moldadas segundo as políticas públicas para gestão dos resíduos sólidos de cada país.

Atualmente, cada país tem sua norma regulamentadora para a utilização dos agregados reciclados, na qual cada um determina as nomenclaturas utilizadas, as classificações e os teores de substituição.

No Reino Unido os agregados são divididos em dois grupos (RA – agregado reciclado e RCA – agregado reciclado de concreto), conforme sua composição. Os agregados classificados como RA são limitados a concretos com classe de resistência máxima de 16 a 20 MPa. Já os agregados classificados como RCA, podem ser utilizados para concretos com função estrutural, já que a classe de resistência é de 40 a 50 MPa. Porém, a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados é restrita a 20% (GONÇALVES e DE BRITO, 2009).

Ainda segundo Gonçalves e De Brito (2009), em Portugal a norma de utilização dos agregados reciclados é similar à da Alemanha. Os agregados reciclados são divididos em três grupos: ARC (agregado reciclado de construção), que apresenta em sua constituição concreto e elementos de alvenaria, sem haver exigências quanto a porcentagens, podendo ser utilizados apenas para concretos sem fins estruturais. Os demais, ARB1 e ARB2 (agregado reciclado de *betão* - concreto), que podem ser substitutos parciais, com teor máximo de substituição de 25% e 20%, respectivamente, dos agregados naturais. Além dos teores de substituição, a norma estabelece a classe de resistência máxima em: C40/50 MPa para ARB1 e C35/45 MPa para ARB2.

A Tabela 2 apresenta a classificação dos agregados reciclados de Portugal.

**Tabela 2** - Composição dos agregados reciclados de Portugal.

Constituinte (%)	ARB1	ARB2	ARC
Concreto			
Agregados não ligados	≥ 90	≥ 70	≥ 90
Alvenaria	≤ 10	≤ 30	
Materiais betuminosos	≤ 5	≤ 5	≤ 10
Partículas Leves	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Outros Materiais	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,1

Fonte: Adaptado de E 471, 2006 *apud* GONÇALVES e DE BRITO, 2009.

A diferença entre o agregado reciclado classificado como ARB1 e o ARB2 está na sua composição, sendo que ARB1 deve apresentar mais do que 90% de sua

composição à base de concreto e menos do que 10% à base de alvenaria, enquanto que o ARB2 deve apresentar mais do que 70% de sua composição à base de concreto e menos do que 30% a base de alvenaria.

No Brasil, a norma regulamentadora NBR 15116 (ABNT, 2004a) permite a utilização dos agregados reciclados na mistura de concreto, porém ainda é restrita a concretos não estruturais, e sua maior utilização é na execução de base e sub-base de pavimentos.

A NBR 15116 (ABNT, 2004a) estabelece requisitos para o emprego dos agregados reciclados de RCD. Os agregados reciclados no Brasil podem ser utilizados em obras de pavimentação viária como reforços de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas e para concretos sem função estrutural.

No Brasil, os agregados reciclados são classificados segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004a) em:

- agregados de resíduo de concreto (ARC) que possuem em sua fração graúda, no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas e;
- agregados de resíduo misto (ARM) que são compostos em sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Cada país apresenta uma norma que rege a utilização dos agregados reciclados para a mistura de concreto, apresentando diferentes tipos de utilização, diferentes teores de substituição, e diferentes nomenclaturas para os agregados reciclados. Por isso, este trabalho não seguirá as nomenclaturas e teores permitidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004a), apresentando futuramente, na metodologia desse trabalho, as nomenclaturas, composições e teores de substituição dos agregados reciclados.

Aos poucos a utilização desse material vêm crescendo, juntamente com o número de pesquisas que estão sendo realizadas no Brasil e no Mundo.

### 3.3 Características dos agregados reciclados

Os agregados reciclados apresentam grande variabilidade em sua composição, e isso ocorre devido à sua origem e à prática de cada local de construção. Por isso, para a produção dos agregados reciclados há a necessidade de uma triagem e uma seleção adequada (LNEC, 2009).

Segundo Gonçalves e de Brito (2009), os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam características diferentes dos concretos produzidos com agregados naturais e essas diferenças estão diretamente ligadas ao tipo de agregado reciclado utilizado na mistura.

Os agregados adicionados à mistura de concreto têm grande importância nas propriedades que serão apresentadas pelo mesmo, podendo modificar propriedades físicas e mecânicas do concreto, como resistência mecânica, a capacidade de absorção de água e porosidade, as quais podem vir a influenciar na durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Por isso, o estudo das características dos agregados reciclados que serão utilizados na mistura do concreto é necessária e de extrema importância.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as propriedades importantes do agregado estão inter-relacionadas e podem ser definidas por:

- Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza, módulo de elasticidade;
- Características dependentes das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência mecânica, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

É possível determinar a qualidade do agregado reciclado através das suas características físicas, químicas e mecânicas.

Devido à capacidade de absorção de água dos agregados reciclados ser maior, quando comparados aos agregados naturais, a demanda necessária de água para a mistura de concreto será maior (MCGUINNIS *et al.*, 2017). Os autores ainda afirmam que através da pré-molhagem dos agregados reciclados, ou através da utilização de aditivos redutores de água, e/ou de cinza volante, essa necessidade de aumento na quantidade de água da mistura pode ser minimizada.

A NBR 15116 (ABNT, 2004a) apresenta os requisitos dos agregados reciclados necessários para a sua utilização em concretos sem fins estruturais. Tais características são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Características dos agregados reciclados para a utilização em concretos sem fins estruturais especificados pela NBR 15116 (ABNT, 2004a).

Propriedades	Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
	ARC		ARM		Agregado Graúdo	Agregado miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥ 90	–	≥ 90	–	Anexo A NBR 15116	–
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	NBT NM 53	NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos		1		NBR 9917	
	Sulfatos		1		NBR 9917	
	Materiais não minerais <sup>1</sup>		2		Anexo A NBR 15116	Anexo B NBR 15116
	Torrões de argila		2		NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes		3		–	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)	≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20	NBR NM 46	

<sup>1</sup> Para efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT, 2004.

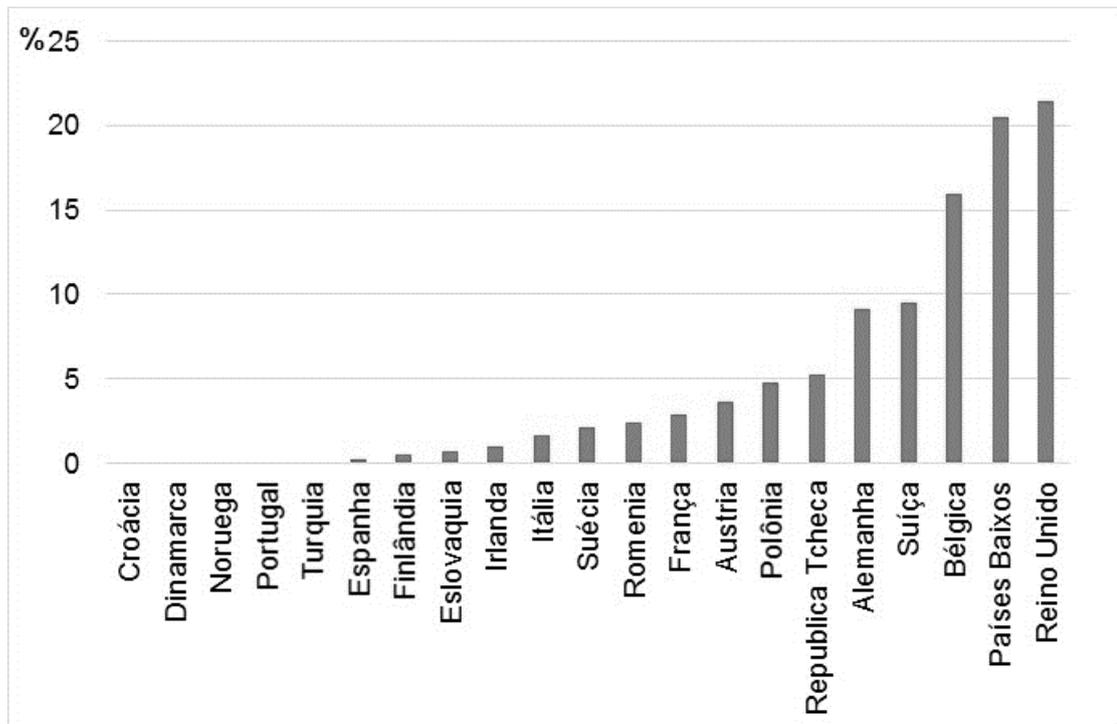
### 3.4 O agregado reciclado na produção de concreto com função estrutural

Segundo Silva e De Brito (2015), o uso de agregados reciclado como substitutos de agregados naturais na produção de concreto vem sendo considerado um dos métodos mais eficientes de reciclagem, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil.

Inicialmente as pesquisas sobre os efeitos causados pela substituição dos agregados naturais por agregados reciclados eram estudos básicos, como a resistência mecânica que os concretos utilizando agregados reciclados poderiam atingir ou a sua viabilidade econômica. Desde o início de tais pesquisas, o interesse pela utilização dos agregados reciclados na mistura de concreto com função estrutural aumentou. Por isso, as pesquisas tornaram-se mais complexas, introduzindo novas variáveis, tais como a durabilidade (SILVA; DE BRITO, 2015).

A utilização dos agregados reciclados no Mundo depende das normas estabelecidas em cada país, da necessidade e das pesquisas realizadas. A Figura 4 apresenta a porcentagem de utilização dos agregados reciclados em relação ao total de agregados utilizados em diferentes países com base em dados do ano de 2005.

**Figura 4** - Porcentagem de consumo de agregado reciclado em relação ao total de agregado utilizado em diferentes países.



Fonte: UEPG, 2005 *apud* WBCSD, 2009.

Na Europa, segundo o código Europeu EM 206 permite-se a utilização dos agregados reciclados em suas práticas gerais, sendo aceitável um teor de até 50% de substituição do agregado natural por agregado reciclado na mistura de concreto dependendo da classe de exposição a qual ele estará submetido (BS EM 206: 2013 *apud* SUCIC e LOTFY, 2016).

Em Hong Kong apenas os agregados graúdos podem ser substituídos por agregados reciclados. São permitidos dois teores de substituição, de 20% e de 100%, sendo que para o teor de substituição de 20% o concreto produzido pode ter função estrutural com resistência à compressão de até 35 MPa; e para o teor de 100% a resistência máxima atingida deve ser de 20 MPa e esse concreto não deve ser utilizado para fins estruturais (GONÇALVES e DE BRITO, 2009).

O governo da Austrália permite a utilização de até 30% de agregados reciclados na mistura de concreto com fins estruturais, já que concretos que utilizam agregados reciclados não apresentaram diferenças na trabalhabilidade e na resistência do concreto quando comparados a concretos que utilizam agregados naturais (WBCSD, 2009).

Segundo Nguyen *et al.* (2017), os agregados reciclados provenientes de concretos de média e alta resistência tem pequena influência nas propriedades do concreto. De uma forma geral as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados reciclados diminuem de 15 a 35% dos valores obtidos por concretos convencionais.

Devido à grande variabilidade na composição dos RCD, o que conseqüentemente gera diferentes tipos de agregados reciclados, a utilização desses materiais na produção de concreto com fins estruturais torna-se ainda mais delicada. A variabilidade dos agregados reciclados pode significar uma inconstância e incerteza sobre as propriedades deste material, o que resulta na variabilidade do produto final, o concreto. O agregado reciclado coletado pode não ser o mesmo encontrado em outros lugares ou em diferentes datas, apresentando características totalmente diferentes quando comparados entre si, e quando incorporados ao concreto, tornam suas características incertas.

#### 4. DURABILIDADE DO CONCRETO

Segundo Amorim (2010), com a finalidade de aumentar a produtividade, reduzir custos e atender demandas no pós-guerra, os projetistas diminuíram as seções das estruturas de concreto armado, reduzindo assim o cobrimento das armaduras.

Com essas modificações, as fissurações no concreto aumentaram e a proteção das armaduras diminuiu, tendo como consequência a diminuição da vida útil da estrutura. Por isto, nas últimas décadas, em função dos crescentes problemas de degradação precoce das estruturas e das exigências de sustentabilidade na construção civil, os estudos realizados privilegiaram os aspectos voltados à durabilidade e à extensão da vida útil (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Quando se pensa em estrutura de concreto armado, pensa-se em aço e concreto exercendo a função estrutural, enquanto o aço resiste aos esforços de tração, o concreto resiste aos esforços de compressão. Duas propriedades importantíssimas para a estrutura de concreto armado são a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade na direção axial.

Segundo Gidrão (2015), o primeiro fator que afeta o módulo de elasticidade é a relação água/cimento ( $a/c$ ). Por exemplo, os concretos com menor relação  $a/c$  tendem a ser mais resistentes e rígidos. Quanto menor a quantidade de água utilizada, menor a porosidade do produto final. E, conseqüentemente, se terá um aumento da capacidade do material em restringir as deformações solicitantes no elemento.

O segundo fator que afeta o módulo de elasticidade, destacado por Gidrão (2015), refere-se às propriedades dos agregados graúdos utilizados para a mistura. Para Mehta e Monteiro (2008), a porosidade do agregado é a característica que mais afeta o módulo de elasticidade do concreto.

De acordo com Neville (1997) a resistência à compressão axial era uma das propriedades mais importantes do concreto, ainda que a permeabilidade seja mais relevante para a durabilidade de estruturas expostas a certos ambientes.

Dotto (2006) afirma que até pouco tempo a resistência à compressão axial do concreto era considerada a propriedade principal quando se pensava em estruturas de concreto armado. Porém, para o autor, a durabilidade e a impermeabilidade da estrutura deveriam ser os parâmetros mais importantes a serem considerados na concepção do projeto estrutural.

A resistência à compressão axial do concreto é uma das maneiras mais eficazes de determinação da capacidade do nível de carga de uma estrutura. Além disso, é uma característica fácil de ser obtida e a partir da qual se pode obter as demais características do concreto (KURAD *et al.*, 2017).

Segundo Kurad *et al.* (2017), a resistência do concreto utilizando agregado reciclado irá depender do teor de substituição utilizado, da idade do concreto, dos aditivos e adições adicionados à mistura, da relação a/c, da qualidade do material de origem do agregado reciclado e o seu tamanho, e do teor de umidade do mesmo.

A durabilidade do concreto pode ser atribuída, na maior parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos na rede de poros do concreto (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Atualmente, existe uma correlação entre permeabilidade e durabilidade com a porosidade do material. Ou seja, quanto mais poroso for o material, maior será a capacidade de entrada e saída de substâncias (permeabilidade) e, conseqüentemente, a estrutura terá uma perda em sua durabilidade, afetando diretamente a sua vida útil.

Além disso, existem também outros tipos de correlação, como a permeabilidade ligada diretamente à resistência mecânica (PEREIRA, 2011). Quando a permeabilidade é relacionada com a resistência mecânica, estudos apontam que quanto maior a resistência menor será o coeficiente de permeabilidade.

O estudo da porosidade *versus* a resistência mecânica do concreto tem como objetivo avaliar a influência do diâmetro dos poros na sua resistência mecânica. Para Odler e Robler (1995) *apud* Pereira (2011), a correlação entre porosidade e resistência mecânica pode ser considerada linear.

Os agregados reciclados apresentam, geralmente, maior capacidade de absorção de água do que o agregado natural devido à sua própria porosidade, isto pode vir a modificar as propriedades do concreto aumentando a sua permeabilidade, diminuindo sua resistência mecânica e, conseqüentemente, reduzindo sua vida útil.

#### 4.1 Conceitos de durabilidade

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, operação e de manutenção. Iffat *et al.* (2014) apontam que durabilidade é a resistência do concreto à deterioração física ou química resultante da interação entre a estrutura e o

ambiente (deterioração física), ou através da interação dos constituintes do concreto (deterioração química).

Estruturas de concreto armado são expostas a diferentes tipos de ambientes e, em muitas vezes, os ambientes são severos. Porém, é sempre esperado que a estrutura dure com poucos reparos ou que não necessite de nenhum reparo por um longo período de tempo (STANISH; HOOTON; THOMAS, s.d.).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) conceitua a durabilidade da estrutura como sendo a capacidade da mesma em resistir às influências ambientais previstas, e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração de projeto. Ou seja, a durabilidade de uma estrutura é a capacidade desta em exercer a função estrutural para a qual foi projetada, resistindo às intempéries do meio ao qual ela está exposta.

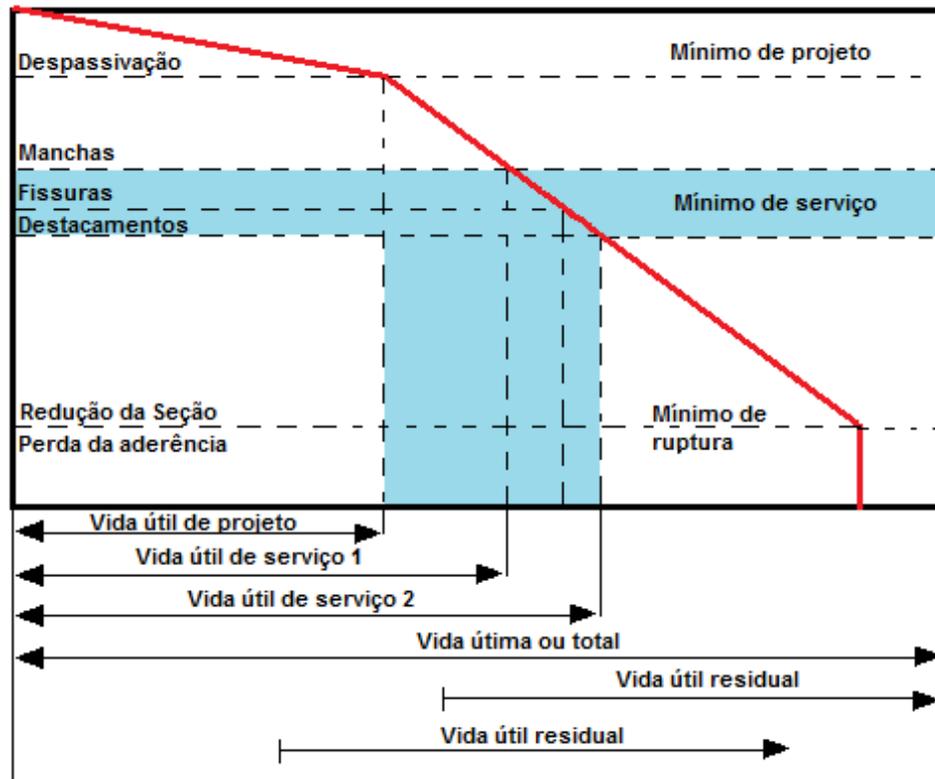
Já o conceito de vida útil para a NBR 6118 (ABNT, 2014) corresponde ao período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor.

A ISO 13823 (2008) *apud* Medeiros, Andrade e Helene (2011), define vida útil como “o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer um de seus componentes satisfaçam os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”. Ou seja, vida útil de uma estrutura é o período de tempo, em anos, que a estrutura continuará exercendo a função para a qual ela foi projetada.

A Figura 5 mostra uma representação do conceito de vida útil das estruturas de concreto armado, tomando por referência o fenômeno de corrosão das armaduras.

Através da representação gráfica apontada na Figura 5, Helene (1997) classificou as etapas e processos que a estrutura de concreto armado sofre durante a sua vida útil. O autor apontou quais são as etapas de deterioração que ocorrem ao longo do tempo, iniciando-se através da despassivação, seguida pelo aparecimento de manchas, fissuras e destacamentos, e por fim, a diminuição da seção e a perda da aderência entre o concreto e o aço. Conforme a entrada e saída de fluidos ocorre no interior do concreto, as etapas vão ocorrendo de forma gradativa, até que se atinja o momento em que a estrutura não consiga mais exercer a função para a qual foi projetada.

**Figura 5** - Representação gráfica do conceito de vida útil das estruturas.



Fonte: HELENE, 1997 *apud* MEDEIROS, ANDRADE e HELENE (2011).

Helene em 1997, dividiu a vida útil de uma estrutura, classificando-a quanto às manifestações apresentadas.

A vida útil de projeto ocorre enquanto os agentes agressivos estão penetrando no interior do concreto através de seus poros, sem causar danos à estrutura.

Já a vida útil de serviço se dá quando os efeitos dos agentes agressivos começam a serem manifestados, através de manchas, fissuras e destacamentos, momento em que a entrada de gases e fluídos interfere e começa a modificar a estrutura.

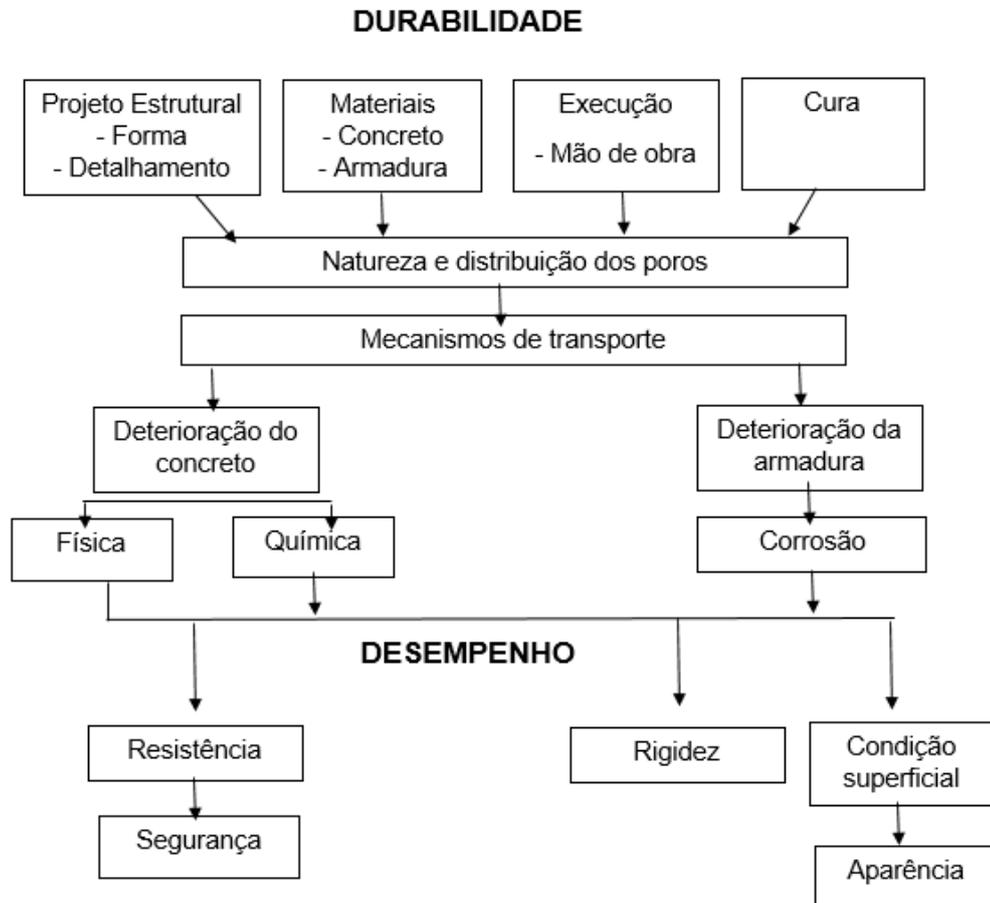
A vida última ou total corresponde ao tempo no qual ocorre a ruptura e colapso, total ou parcial, da estrutura.

E por fim, a vida útil residual corresponde ao período de tempo no qual a estrutura poderá desenvolver as suas funções (HELENE, 1997 *apud* MEDEIROS, ANDRADE; HELENE, 2011).

A Figura 6 apresenta os fatores que estão interligados na durabilidade e desempenho das estruturas, demonstrando que as manifestações patológicas

apresentadas pelas estruturas não dependem de um único fator, mas sim de diversas causas (ANDRADE, 1997).

**Figura 6** - Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e o desempenho das estruturas.



Fonte: CEB, 1992 *apud* Andrade, 1997.

Na Figura 6, pode-se observar que a estrutura está interligada com os processos realizados, desde a sua produção até a interação do meio no qual ela está exposta.

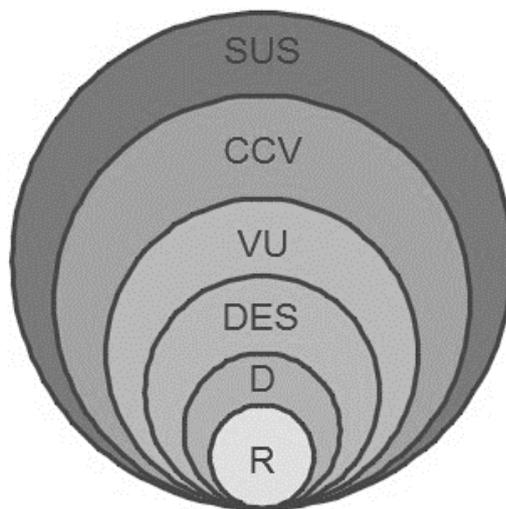
Primeiramente, para a garantia que uma estrutura corresponda aos parâmetros mínimos de qualidade e de utilização, o projeto estrutural, a forma e o detalhamento, devem ter sido calculados de maneira correta e segura, conforme orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, os materiais utilizados para a produção do concreto, a execução realizada pela mão de obra e a cura do concreto são extremamente importantes para determinar a qualidade da estrutura e a disposição dos poros no

concreto, característica essa que está diretamente ligada à permeabilidade e, conseqüentemente, à durabilidade final que a estrutura apresentará.

Através da distribuição dos poros do concreto e dos mecanismos de transporte existentes, ocorre a passagem de gases e líquidos no seu interior, afetando diretamente o concreto em si e a armadura. Com a entrada de substâncias, as deteriorações começam a ocorrer, e a estrutura de concreto armado começa a perder o seu desempenho.

Assim como a Figura 6, a Figura 7 representa a interação que deve existir na concepção e produção de uma estrutura. Cada propriedade e característica da estrutura está diretamente ligada à outra; se uma propriedade não estiver condizente com os parâmetros mínimos de qualidade, a estrutura inteira não estará correspondendo a esses parâmetros.

**Figura 7** - Representação da evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto.



Fonte: POSSAN, 2010 *apud* MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011.

Por exemplo, na Figura 7 cada conceito da estrutura está demonstrado de forma interligada, ou seja, para que a estrutura seja sustentável ela deve apresentar resistência mecânica (R) adequada, ser uma estrutura durável (D), desempenhar (DES) a função para a qual foi construída, garantir uma vida útil (VU) adequada e longa e, conseqüentemente, seu custo de ciclo de vida (CCV) será menor e a estrutura poderá ser classificada como sustentável (SUS). Tudo está interligado, e cada conceito depende do outro, se apenas a resistência mecânica for levada em

consideração, os outros parâmetros podem não atingir uma qualidade adequada, e conseqüentemente isso afetará o conjunto como um todo.

Para Medeiros, Andrade e Helene (2011), a questão da vida útil das estruturas de concreto deve ser considerada de forma holística, abrangente e sistêmica, envolvendo equipes multidisciplinares. Todas as etapas do processo produtivo devem ser analisadas: concepção, planejamento, projeto, materiais e componentes, execução e uso da estrutura.

Ou seja, para que a estrutura atinja seu maior potencial, apresentando uma vida útil elevada, exercendo assim, da melhor maneira, a função na qual foi projetada, todo o sistema que engloba a concepção, a construção e manutenção deve ser pensado de forma homogênea e em conjunto. Com isso, é possível garantir que todos os conceitos mencionados na Figura 7 desde a resistência mecânica da estrutura até a sustentabilidade sejam planejados e executados.

Para que uma estrutura seja sustentável, ou seja, que não necessite de reparos e reformas durante a sua utilização, todos os aspectos anteriores mencionados na Figura 7 devem ser analisados e desenvolvidos. O sistema está interligado, cada conceito depende da eficácia do anterior, e vice-versa.

#### 4.2 Classes de agressividade ambiental

Os estudos de durabilidade das estruturas de concreto geralmente levam em consideração os materiais utilizados para a produção de uma determinada estrutura (agregados, cimento, aço), sua mistura (relação a/c, aditivos e adições), e a cura desse material (LIMA, 2011). Porém, como citado anteriormente, conhecer o concreto e a geometria da estrutura é importante, mas conhecer a agressividade do meio ao qual a estrutura estará exposta durante toda a sua vida útil também é necessário.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a agressividade do meio ao qual a estrutura está exposta está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre ela, e isto independe das ações mecânicas previstas no seu dimensionamento.

O responsável pelo projeto estrutural deve determinar qual é a agressividade do meio ao qual a estrutura dimensionada estará exposta durante toda a sua vida útil, conforme a classificação da norma. Esta classificação é realizada de acordo com a Tabela 4, que se encontra também na NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Tabela 4** - Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup> Industrial <sup>a, b</sup>	Grande
IV	Muito forte	Industrial <sup>a, c</sup> Respingos de maré	Elevado

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambiente com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Como apresentado na Tabela 4, a NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica seis meios aos quais a estrutura poderá estar exposta durante a sua vida útil, sendo eles: rural, submerso, urbano, marinho, industrial e respingos de maré; para cada um destes meios são definidas as classes de agressividade.

Vale ressaltar que na versão da NBR 6118 de 2003 a classificação apresentada na Tabela 4, referente às classes de agressividade ambiental, já era considerada.

A partir da definição da classe de agressividade ambiental, são determinados; limite máximo de relação a/c, classe mínima de resistência e o cobrimento nominal da armadura.

Diferentemente da NBR 6118 (ABNT, 2014), Lima (2011) apresentou uma nova proposta quanto à classificação dos meios ao qual a estrutura poderá estar exposta em três tipos, sendo eles:

- meio ambiente urbano: Por suas características de concentração populacional, o meio urbano modifica-se diariamente e devido aos problemas que neles ocorrem, como a chuva ácida, o lançamento de dióxido de carbono na atmosfera (diretamente responsável pela corrosão das armaduras), entre outros, afetam diretamente as estruturas de concreto e;

- meio ambiente marinho: no qual são encontrados vários agentes que atuam negativamente sobre as estruturas de concreto, podendo ser agentes químicos, agentes físicos e agentes biológicos, reduzindo seu desempenho.

No ambiente marinho a água salgada é o principal agente responsável por processos físicos e químicos de degradação, segundo Mehta e Monteiro (2008) *apud* Lima (2011), já que na água do mar é possível encontrar íons de praticamente todos os elementos da tabela periódica e;

- ambiente marinho urbano: é na zona costeira que vive a maioria da população; 6 em cada 10 pessoas vivem em área com raio de até 60 km do litoral. O ambiente marinho acaba modificando-se devido aos problemas que as cidades trazem, como o esgoto e os resíduos industriais, a contaminação de recursos hídricos que chegam até o mar e a atmosfera, aumentando ainda mais a agressividade do meio marinho (WORLD COAST CONFERENCE, 1993 *apud* LIMA, 2011).

Em seu trabalho, Lima (2011) também cita as condições climáticas às quais a estrutura poderá estar exposta e o que cada uma delas poderá acarretar à estrutura de concreto armado.

#### 4.3 Ataques à estrutura de concreto armado

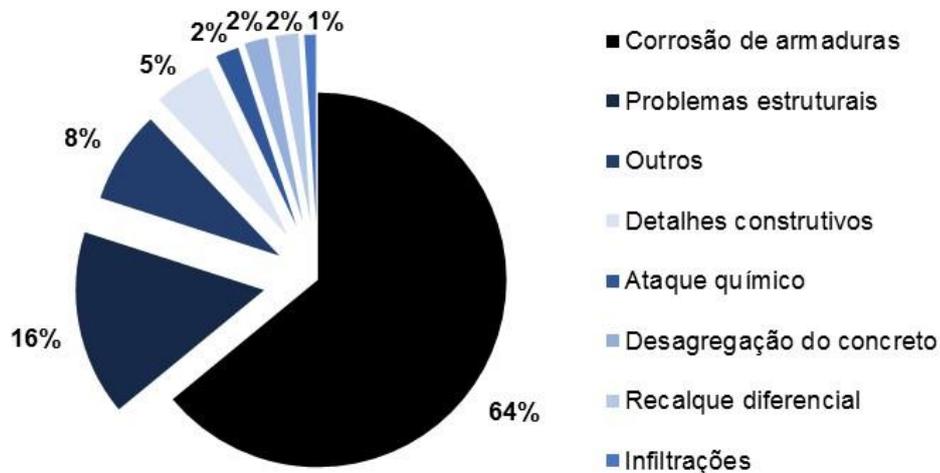
A perda da vida útil da estrutura de concreto armado se dá pela corrosão das armaduras, através dos ataques de agentes deterioradores à própria estrutura. Zhang e Shao (2016) apontam que a corrosão do aço é um dos principais problemas de diminuição da durabilidade da estrutura.

Segundo Ollivier e Vichot (2014), a corrosão das armaduras de concreto é induzida por dois fenômenos distintos: a carbonatação e a penetração de íons cloreto. Esses dois mecanismos são os principais responsáveis pelos danos e problemas relacionados a reforço de estruturas de concreto (DE SCHUTTER e AUDENAERT, 2004).

Um estudo realizado no estado de Pernambuco, no ano de 1997, por Andrade (1997), apresenta as principais causas de deterioração em estruturas de concreto armado, sendo a maior delas a corrosão de armaduras (64%). A Figura 8 apresenta

as manifestações patológicas e a porcentagem de ocorrência naquele ano para aquele local.

**Figura 8** - Manifestações patológicas no concreto no estado de Pernambuco em 1997.



Fonte: ANDRADE, 1997.

Porém, alguns autores apontam que o concreto armado submetido aos dois fenômenos, carbonatação e penetração de íons cloreto, é considerado mais vulnerável do que o que está exposto a apenas um fenômeno (ZHANG e SHAO, 2016). Hussain *et al.* (1995) apontam que o pH reduzido causado pela carbonatação reduz o limite necessário no teor de cloreto dentro do concreto para que se inicie o processo de deterioração, ou seja, a corrosão da armadura inicia-se prematuramente.

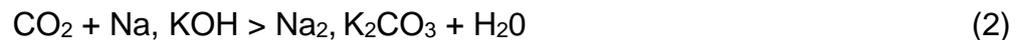
#### 4.3.1 Carbonatação

A carbonatação do concreto é um processo físico-químico, que consiste no avanço do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera em direção ao interior do concreto, através dos poros.

O dióxido de carbono combina-se no interior do concreto com hidróxidos alcalinos dissolvidos, formando carbonatos (AHMAD, 2003; DOTTO, 2006;).

A penetração de  $\text{CO}_2$  na argamassa e a sua transformação em ácido, através da água dos poros, faz com que o valor do pH da solução aquosa seja alterado, de 12,5 para um pH em torno de 9 (SILVA, 2006).

Silva (2006) apresenta, através da Equação 1 e Equação 2, a ação que ocorre no interior do concreto:



Com a geração desses carbonatos, têm-se uma redução no tamanho dos poros e do pH do concreto ocorrendo o fenômeno de carbonatação (DE SCHUTTER; AUDENAERT, 2004). Com isso, o concreto deixa de ser básico e passa a ser ácido, afetando diretamente a proteção das barras de aço presentes no interior do concreto, que podem sofrer corrosão.

A carbonatação é a maior causa de deterioração da estrutura, porém é um fenômeno que não afeta diretamente o concreto, e sim causa corrosão da armadura (FAELLA *et al.*, 2016).

#### 4.3.2 Penetração de íons cloreto

Segundo De Schutter e Audenaert (2004), os íons cloreto podem estar presentes na mistura de concreto, nos agregados, na água, ou até mesmo nos aceleradores utilizados na mistura, mas os ataques mais frequentes são dos íons que estão presentes no meio, fora do concreto. Por exemplo, aqueles presentes na água do mar.

Para Silva (2006), a corrosão das armaduras ocasionadas pela penetração de íons cloreto é um dos problemas mais sérios que pode ocorrer na estrutura. Os íons cloreto são capazes de despассивar a armadura mesmo em condições de pH elevado.

Wang *et al.* (2016) apontam que a corrosão do aço induzida pela penetração de íons cloreto é a principal causa de deterioração das estruturas de concreto armado. Os autores apontam que a difusividade do concreto à penetração dos íons cloreto é um fator crucial, principalmente em ambientes marinhos. Ou seja, quanto maior a difusividade, maior a capacidade de penetração dos íons no interior do concreto.

Homan *et al.* (2016) apontam que a corrosão ocasionada pela presença de íons cloreto ocorre quando o teor de cloreto que está em contato com a armadura atingiu um valor limite, e o teor de umidade no concreto é alto. Os autores ainda apontam que a interação dos íons cloreto com a umidade no concreto é muito importante para o desempenho da estrutura a longo prazo, ou seja, quanto mais úmido maior será a

concentração de íons cloreto e, conseqüentemente, menor será a durabilidade da estrutura.

Para que ocorra o transporte dos íons cloreto para o interior do concreto através da umidade do concreto existem duas maneiras, sendo elas: totalmente saturado e parcialmente saturado. O mecanismo dominante para o transporte dos cloretos no interior do concreto é através do gradiente de concentração, ou seja, através da permeabilidade (HOMAN *et al.*, 2016).

Para Andrade (1993), a penetração de íons cloreto no interior do concreto é um dos fatores que estão diretamente ligados à despassivação da armadura e, conseqüentemente, ao encurtamento da vida útil da estrutura. O tempo necessário para que os íons adentrem o interior do concreto depende primeiramente do mecanismo de entrada e, em segundo lugar, da concentração externa de íons e da microestrutura do concreto.

Wang *et al.* (2016) apontam que nas últimas décadas, diversas investigações estudando a penetração de íons cloretos foram realizadas, e a maioria delas estão voltadas para o coeficiente de difusão dos íons cloreto. Porém, os autores apontam que é inevitável que estruturas de concreto armado não apresentem fissuras, trincas e rachaduras, quando submetidas a carregamentos mecânicos ou a ataques físicos ou químicos, e estas podem facilitar a entrada dos íons cloreto promovendo a deterioração da estrutura.

#### 4.4 Mecanismos de transporte de gases e fluídos no interior do concreto

O estudo sobre a durabilidade das estruturas evoluiu ao longo dos anos, devido ao conhecimento dos mecanismos de transporte dos líquidos e gases agressivos no meio poroso. Para De Schutter e Audenaert (2004), a estrutura do poro é de extrema importância para a durabilidade do material.

Segundo Helene (1983) *apud* Medeiros, Andrade e Helene (2011), há a necessidade de conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do meio ambiente, bem como o de conhecer o concreto e a geometria da estrutura.

A durabilidade da estrutura de concreto é primeiramente influenciada por sua microestrutura: a conectividade, a tortuosidade, a continuidade e o tamanho dos poros, determinando assim, como gases, líquidos e outras substâncias penetram no

interior do concreto (FERREIRA, 2014; OLLIVIER *et al.*, 1995 *apud* DODDS *et al.*, 2017).

Os mecanismos de degradação do concreto dependem do potencial agressivo das substâncias que podem penetrar no mesmo, possivelmente causando danos (DE SCHUTTER e AUDENAERT, 2004).

Segundo De Schutter e Audenaert (2004), está estabelecido que a durabilidade do concreto em sua grande extensão é determinada pela habilidade de penetração e potencial agressivo das substâncias que adentram pelo sistema de poros da estrutura.

Os mecanismos de transporte são as principais causas para movimentação de agentes no interior da estrutura e estes podem modificar a estrutura interna dos materiais, influenciando diretamente na durabilidade. Por isto, é necessário o estudo dos mecanismos de transporte, por serem parâmetros importantes para a determinação da vida útil de uma estrutura (PEREIRA, 2011).

Os principais mecanismos de transporte no meio poroso são a permeabilidade, a difusão e a absorção capilar.

A permeabilidade está diretamente ligada à estrutura da pasta de cimento, ao agregado e à interface pasta-agregado, que determinam a facilidade com que fluídos e gases adentram a estrutura (FERREIRA, 2014).

Esta propriedade é definida pela aptidão do concreto em permitir a passagem de um fluido, quando sujeito a um gradiente de pressão, ou seja, é uma propriedade macroscópica. Quanto menor a permeabilidade do concreto menor é a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

A permeabilidade do concreto é uma propriedade ligada diretamente à porosidade e à conectividade dos poros, afetando diretamente a durabilidade da estrutura. Segundo De Schutter e Audenaert (2004), quanto mais abertos os poros da estrutura de concreto mais vulnerável ele será aos mecanismos de degradação causados pela penetração de substâncias.

No passado, acreditava-se que o principal mecanismo de transporte de substâncias no interior do concreto era a permeabilidade. Porém, segundo Dotto (2006), o ingresso da água e dos íons cloreto no interior do concreto se dá principalmente por difusão e absorção capilar.

A difusão é um mecanismo de transporte de matéria, em escala molecular, sob gradiente de concentração. Se existe uma diferença de concentração entre dois pontos do meio, este fenômeno produz um transporte do constituinte considerado da

zona mais concentrada, para a menos concentrada, até que haja equilíbrio em ambas (OLLIVIER; VICHOT, 2014; DODDS *et al.*, 2017).

Para que a difusão ocorra, é necessário que haja uma diferença de pressão entre as faces do material. A difusão ocorre com a presença de água no interior dos poros do concreto, e esta movimentação no interior do mesmo acarreta interações químicas entre a água e a matriz de cimento, podendo desencadear diversos problemas para a estrutura, tais como a carbonatação. Concretos mais duráveis apresentam valores de coeficiente de difusão menores (PEREIRA, 2011).

Segundo Dodds *et al.* (2017), a difusão é um processo muito mais lento do que a absorção de água. O processo que ocorre é o movimento dos íons no poro saturado do concreto, enquanto que a absorção da água ocorre no estado seco e semi seco.

A absorção capilar, segundo Pereira (2011), é um dos principais mecanismos que proporcionam a deterioração do concreto.

A absorção de água está relacionada ao transporte de líquidos e íons que ocorre devido a uma tensão na superfície do concreto (DODDS *et al.*, 2017).

Para Andrade (1993), em concretos não saturados, os cloretos penetram na maioria dos casos por absorção capilar, enquanto que em concretos saturados ou parcialmente saturados essa penetração de cloretos se dá por difusão.

Tanto a difusão como a absorção capilar podem ser extremamente prejudiciais para estruturas que estejam em ambientes de classes de agressividade maiores, devido à presença de substâncias, tais como íons cloreto, íons sulfato e de substâncias que causam a carbonatação das armaduras.

A capacidade de absorção de água do concreto é considerada uma das principais propriedades que afetam a sua durabilidade, pois os agentes agressivos só conseguem se movimentar dentro da estrutura devido a presença de água (PEREIRA, 2011).

#### 4.5 Avaliação da durabilidade por medição indireta

A durabilidade e a vida útil de uma estrutura são conceitos que não podem ser determinados e nem quantificados em laboratório. Como determinar um período de tempo no qual uma estrutura continuará exercendo a finalidade para a qual foi projetada, se as estruturas devem durar décadas?

Não existem estudos que consigam determinar, em laboratório, uma forma de quantificar a durabilidade e vida útil das estruturas. Por isso, quando se fala desses conceitos, pensa-se sempre nas propriedades dos materiais que podem afetar ou diminuir o tempo durante o qual a estrutura continuará exercendo a sua função.

Segundo Silva e Andrade (2017), o desempenho da durabilidade do concreto é medido em função das características de permeação do mesmo, considerando a integridade do concreto contra os agentes agressivos do meio.

Essas propriedades estão ligadas à facilidade de penetração e ao transporte de substâncias no interior do concreto, sendo elas a permeabilidade, a porosidade e a capacidade de absorção de água.

#### 4.5.1 Capacidade de absorção de água por imersão e por capilaridade

O transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto se dá principalmente pelos mecanismos de absorção capilar, permeabilidade e difusão.

Como citado anteriormente, a durabilidade do concreto está diretamente ligada à capacidade de permeação do mesmo, e então Silva e Andrade (2017) apontam que a absorção de água é o primeiro ponto essencial para análise de durabilidade do concreto.

Para a determinação da capacidade de absorção de água utilizam-se, no Brasil, as normas NBR 9778 (ABNT, 2005) e a NBR 9779 (ABNT, 2012) para determinação da capacidade de absorção de água por imersão e por capilaridade, respectivamente. A capacidade de absorção de água por imersão tem como objetivo o de determinar a capacidade dos poros passantes do concreto, enquanto que a capacidade de absorção de água por capilaridade tem como objetivo o de determinar a capacidade dos poros finos que permitem a ascensão da água.

Para De Schutter e Audenaert (2004), a capacidade de absorção de água por imersão é um parâmetro considerado relevante para análise da durabilidade.

Afroughsabet *et al.* (2017) determinaram a absorção de água por imersão de corpos de prova de acordo com a ASTM C642, que consiste em calcular a absorção de água por imersão através do percentual da diferença de peso entre as amostras secas e as amostras imersas em água durante 7 dias.

Silva e Andrade (2017) obtiveram capacidade de absorção de água maior para os concretos com agregado reciclado quando comparados com o concreto referência.

Esse comportamento pode estar associado ao aumento da porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados, devido à porosidade do material. Para os concretos produzidos com relação a/c de 0,6 a capacidade de absorção de água ficou em torno dos 6,7% para o concreto referência e, em torno de 7,4%, para o concreto produzido com agregado reciclado com teor de substituição de 25%.

Xuan *et al.* (2017) também apresentaram resultados de capacidade de absorção de água. Para concretos utilizando agregados naturais, o resultado da absorção de água foi em torno de 5,2%, enquanto para concretos com teor de substituição de 20% foi 6,7%, para o teor de substituição de 40% foi obtido o resultado de 8,8% de capacidade de absorção de água. Os autores também obtiveram resultado de absorção de água para teor de substituição de 100% de agregado natural por agregado reciclado, representando 14,5% de capacidade de absorção de água.

Xuan *et al.* (2017) apresentaram um tipo de tratamento aplicado aos agregados. Os agregados reciclados foram carbonatados com o objetivo de melhorar as suas características físicas e mecânicas. Como resultado, os concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados apresentaram menor capacidade de absorção de água, ou seja, a capacidade de entrada de água e de outros fluídos desse concreto foi menor do que para concretos produzidos com agregado reciclado não carbonatados

Para que fosse possível a obtenção desses agregados reciclados carbonatados, os autores desenvolveram uma técnica de tratamento. O processo de carbonatação dos agregados reciclados consistiu em colocar os agregados em uma câmara de aço cilíndrica hermética de 100 L, com uma concentração de 100% de dióxido de carbono durante 24 h com pressão de 0,1 Bar e 5,0 Bar, dependendo do tipo de agregado. O objetivo era o de precipitar  $\text{CaCO}_3$  nos poros dos agregados, melhorando a microestrutura do mesmo (XUAN *et al.*, 2017).

#### 4.5.2 Determinação da permeabilidade do concreto

Para a determinação da permeabilidade dos concretos, a literatura apresenta diversos estudos e métodos, porém já existem equipamentos desenvolvidos para determinar a permeabilidade ao ar e a água, como o *Poroscope*, da James Instrument.

O *Poroscope* utiliza a técnica de injeção de ar ou de água, sob pressão, para determinar a permeabilidade do concreto ao ar e à água, respectivamente.

A Figura 9 apresenta uma fotografia do equipamento *Poroscope*.

**Figura 9** - Fotografia do *Poroscope*.



Fonte: da autora, 2017.

Nesse procedimento, a permeabilidade do concreto é definida em função do tempo que o ar e/ou a água levam para penetrar o seu interior. Através deste tempo de ensaio, têm-se a classificação do concreto quanto à sua permeabilidade. O manual do equipamento *Poroscope* apresenta uma tabela (Tabela 5) que correlaciona o tempo de ensaio com a classificação do concreto.

**Tabela 5** - Classificação do material quanto a permeabilidade.

Categoria de Qualidade	Tempo (s)	Qualidade de Proteção
0	< 30	Pobre
1	30 - 100	Moderado
2	100 - 300	Satisfatório
3	300 - 1000	Bom
4	> 1000	Excelente

Fonte: Manual *Poroscope*™ James Instruments.

O equipamento *Poroscope* pode ser utilizado para determinar a permeabilidade superficial do concreto, como apresentado na Figura 10.

**Figura 10** – Ensaio para determinação de permeabilidade superficial com o equipamento com o *Poroscope*.



Fonte: da autora, 2017

Sotto (2014) e Cenalmor *et al.* (2015) já vêm utilizando o equipamento *Poroscope* para determinação da permeabilidade do concreto ao ar e à água.

Cenalmor *et al.* (2015) analisaram a permeabilidade superficial ao ar e à água, e permeabilidade profunda ao ar e à água de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes da britagem de peças pré-fabricadas (agregado reciclado de concreto). Os autores utilizaram dois teores de substituição: 50% e 100%.

Como resultados obtidos os autores apontaram que a substituição de até 50% do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto é aceitável para a utilização de concretos com fins estruturais. Para os resultados de permeabilidade profunda ao ar, todos os traços permitiram a obtenção de permeabilidade satisfatória e 67% apresentaram permeabilidade boa; nos ensaios de permeabilidade superficial ao ar 75% dos traços apresentaram resultados satisfatórios.

Para os ensaios de permeabilidade a água, Cenalmor *et al.* (2015) obtiveram para todos os traços com classificação boa quanto à permeabilidade à água, sendo que 50% obtiveram a classificação de excelente.

Sotto (2014) utilizou pós reativos para a produção de concretos, porém para o traço referência aos 28 dias o resultado obtido da permeabilidade ao ar foi de 537 s, sendo classificado como bom.

#### 4.5.3 Determinação da ocorrência de carbonatação

Segundo Gandía-Romero *et al.* (2016), nas estruturas de concreto armado uma das mais frequentes causas de patologia e, possivelmente responsável por um dos maiores gastos, é com os reforços devido à corrosão.

O dióxido de carbono penetra nos poros do concreto e combina-se com os compostos presentes no interior do mesmo; conseqüentemente são formados carbonato de cálcio, que juntamente com a água encontrada nos poros faz com que o pH da estrutura chegue a 9, despassivando a armadura.

A maior dificuldade da carbonatação, é que os testes utilizados para a sua determinação são destrutivos, causando a deterioração do material analisado (GANDÍA-ROMERO *et al.*, 2016).

Porém, para determinação da profundidade de carbonatação do concreto, alguns autores vêm utilizando o método colorimétrico de aspensão de uma solução de fenolftaleína com concentração de 1%, capaz de mostrar as áreas em que o pH foi diminuído (VALLS e VÁSQUEZ, 2001; GANDÍA-ROMERO *et al.*, 2016).

Silva e Andrade (2017) introduziram os corpos de prova em uma câmara de carbonatação com um fornecimento contínuo de dióxido de carbono com uma concentração interna igual a 3%, mantendo a temperatura ambiente. Os autores também apontam que a pressão do ar dentro da câmara era igual à pressão atmosférica, e que a umidade dentro da mesma ficava em torno de 65 a 75%. Os corpos de prova foram introduzidos na câmara de carbonatação após os 28 dias de cura submersa e 4 dias secando em ambiente natural protegidos da água.

O teste de carbonatação durou 23 semanas, sendo que a primeira medida de carbonatação foi determinada após 15 dias dentro da câmara e foram medidos a cada 30 dias. Os autores aspergiram fenolftaleína com concentração de 1% nas faces internas dos corpos de prova com o objetivo de medir a profundidade de carbonatação.

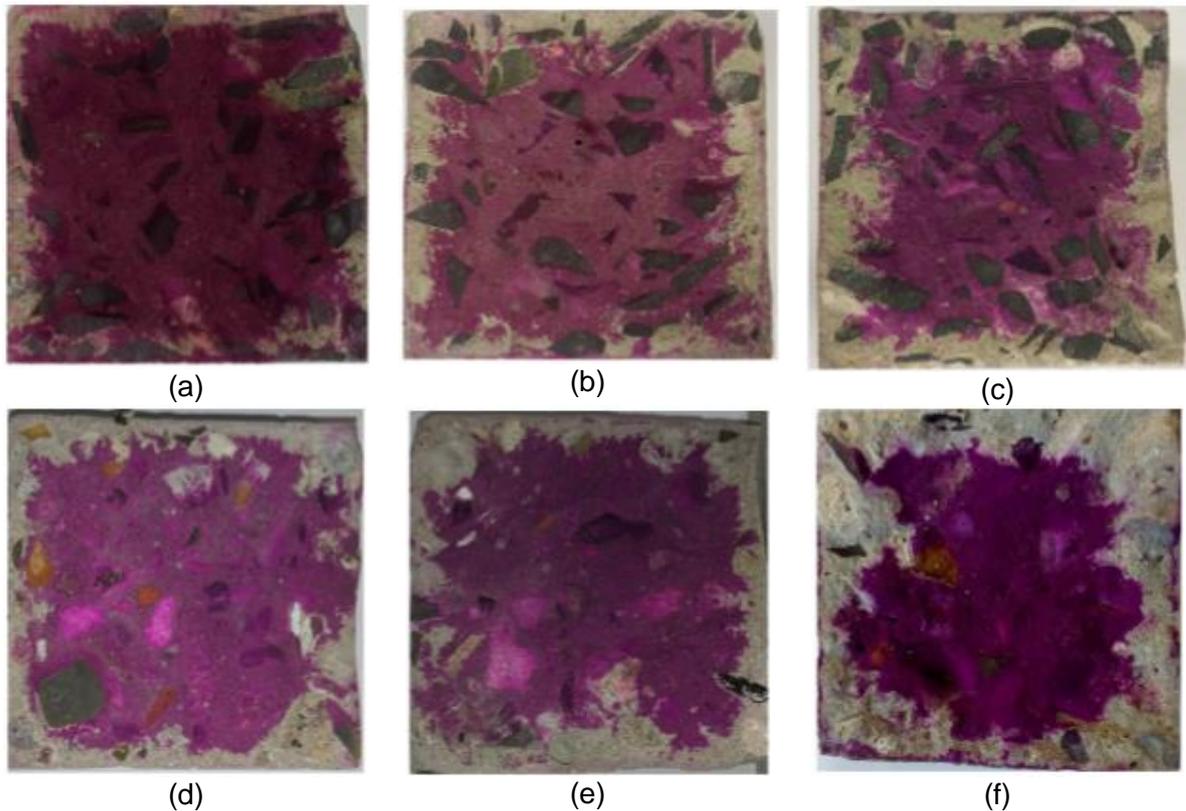
Silva e Andrade (2017) apontam que concretos utilizando agregados reciclado apresentam uma porosidade alta, quando comparados a concretos que utilizam agregado natural, e que esta característica tem uma significativa influência no processo de carbonatação.

Na Figura 11, são apresentados os resultados obtidos por Silva e Andrade (2017) para concretos com relação a/c de 0,50, sendo que o traço referência

apresentava teor de 0% de agregado reciclado e 20% de cinza volante e aquele utilizando agregado reciclado apresentava um teor de substituição de 100% de agregado natural por agregado reciclado e 20% de cinza volante.

Observa-se nas imagens da Figura 11, que para as idades mais avançadas a profundidade de carbonatação foi maior, e quando comparados o traço referência com o traço produzido com 100% de agregado reciclado a carbonatação da amostra com agregado reciclado foi ligeiramente maior, acentuando a diferença entre ambos os traços na idade mais avançada (165 dias).

**Figura 11** - Carbonatação do concreto com relação a/c de 0,5 – (a), (b), (c) 0% agregado reciclado e 20% de cinza volante nas idades de 45 dias, 75 e 165 dias, respectivamente; (d), (e), (f) 100% agregado reciclado e 20% de cinza volante nas idades de 45, 75 e 165 dias.



Fonte: SILVA e ANDRADE, 2017.

Kubissa *et al.* (2017) utilizaram uma metodologia similar à de Silva e Andrade (2017). Os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação, porém Kubissa *et al.* (2017) apontaram que a temperatura mantida na câmara era de 40 °C, a umidade era de 60% e a concentração de dióxido de carbono utilizada era de 10%.

Foram medidas a profundidade de carbonatação através da aspersão de fenolftaleína para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Pedro, Brito e Evangelista (2017) apontaram que, geralmente, a profundidade de carbonatação de concretos utilizando agregado reciclado é maior do que a do concreto convencional. Os autores apresentaram resultados de profundidade de carbonatação aos 91 dias; para o concreto utilizando agregado natural a profundidade atingiu o valor de 5,0 mm, enquanto que, o concreto utilizando agregado reciclado apresentou valores entre 6,2 a 10,6 mm. Vale ressaltar que a determinação da profundidade de carbonatação foi definida pelos autores após 91 dias em câmara de carbonatação, com temperatura constante de 20 °C e concentração de dióxido de carbono em 5 +/- 1%.

Pedro, Brito e Evangelista (2017) ainda apontaram que mesmo os resultados de profundidade de carbonatação terem sido maiores para concretos produzidos com agregado reciclados, a diferença dessa profundidade para a de concretos produzidos com agregado natural ficou entre 3 a 6 mm.

#### 4.5.4 Determinação da presença de íons cloreto

Devido à alcalinidade da matriz de cimento, o aço presente no concreto armado está sujeito à corrosão. Neste caso, a perda dessa passividade ocorre quando os íons cloreto presentes no meio ambiente atingem a armadura (REAL *et al.*, 2015).

O método colorimétrico para determinação da profundidade de penetração de íons cloreto vem sendo utilizado juntamente com o ensaio acelerado de migração de cloretos, prescrito pela ASTM C 1202/05 (REAL *et al.*, 2015).

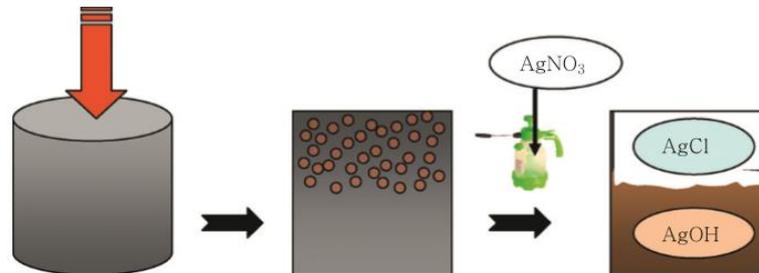
O método de aspersão de nitrato de prata no concreto consiste na aplicação de uma solução aquosa de 0,1 M de AgNO<sub>3</sub> às fatias do concreto. Esse procedimento causa formação de duas regiões bem definidas, sendo: uma esbranquiçada de cloreto de prata (AgCl), que indica a presença de cloretos; e outra marrom, que corresponde à região livre de cloretos (SILVA, 2006; CRAUSS, 2010; FRANÇA, 2011; KIM *et al.*, 2013; REAL *et al.*, 2015;).

Omrane *et al.* (2017) colocaram corpos de prova imersos em uma solução salina de concentração de 3% de cloreto de sódio (NaCl) durante 28, 56, 90 e 120 dias. Após os corpos de prova atingirem a idade desejada, os mesmos foram cortados

em duas partes, e a solução de 0,1 M de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) foi aspergida em ambas as partes para determinar a profundidade de penetração dos íons cloreto.

A Figura 12 representa o desenvolvimento do método de ensaio.

**Figura 12** - Ilustração do método de colorimetria de aplicação de nitrato de prata.



Fonte: KIM *et al.*, 2013.

#### 4.5.5 Determinação da difusão de íons cloreto

A durabilidade de uma estrutura é o resultado de diversas interações, e para se avaliar o desempenho das construções, é comum a utilização de aspectos visuais, determinando assim as causas das manifestações patológicas de modo a escolher a melhor maneira de recuperar a estrutura (REAL *et al.*, 2015).

Segundo Castellone *et al.* (2001), o tempo que o aço leva para ser corroído é composto por duas etapas, sendo elas: o tempo que o agente agressivo leva para chegar à barra de aço, e a própria despassivação da armadura.

O coeficiente de difusão no concreto é de extrema importância para se determinar a vida útil que a estrutura terá. O método mais atual para determinação do coeficiente de difusão é baseado na segunda Lei de Fick. Esta tem como objetivo mensurar a distância percorrida pelos íons cloreto a partir da superfície do concreto, ou seja, qual a distância que os íons penetraram no interior do concreto. Porém, esse método é um procedimento complicado e longo (KIM *et al.*, 2013).

Medeiros Junior (2014) apontou que tanto a absorção, quanto a difusão, devem ser consideradas nas propostas de modelagens do ingresso dos cloretos. Porém, a maioria dos modelos apenas considera um mecanismo, e na maioria dos casos a difusão é o único parâmetro levado em consideração. Medeiros Junior (2014) ainda afirmou que na segunda lei de Fick apenas a difusão é modelada.

A migração de íons cloreto através do concreto é um processo lento, e então pesquisadores buscaram uma maneira de acelerar essa migração. Quando uma

tensão elétrica é aplicada em uma amostra de concreto, aumenta-se e acelera-se a velocidade em que os cloretos migram no concreto (IFFAT *et al.*, 2014).

O método mais comum utilizado para determinar a profundidade de penetração de íons cloreto é pela ASTM C1202/05 (REAL *et al.*, 2015). Segundo Medeiros (2014), o método ASTM C1202/05 baseia-se no monitoramento de uma corrente elétrica que passa por uma amostra de concreto.

A Tabela 6 apresenta a permeabilidade de cloretos em função da carga passante durante o ensaio.

**Tabela 6** - Permeabilidade de cloreto baseado na carga passante.

Carga Passante (Coulombs)	Permeabilidade de cloretos	Típico de
> 4000	Alta	Elevada relação a/c (> 0,60)
2000 - 4000	Moderada	Moderada relação a/c (0,40 - 0,50)
1000 - 2000	Baixa	Baixa relação a/c (< 0,40)
100 - 1000	Muito Baixa	Concreto fechado internamente
< 100	Insignificante	Concreto com polímeros

Fonte: Technical Bulletin TB 0100 (Concrete), 2006.

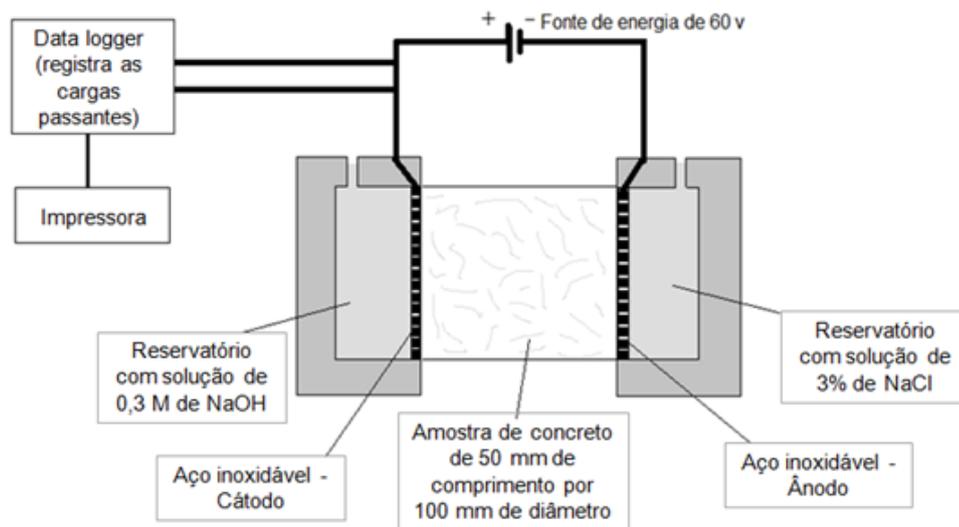
Segundo Iffat *et al.* (2014), o total de carga passante, em Coulombs, está diretamente relacionado com a resistência à penetração de íons cloreto, ou seja, quanto maior a passagem de carga, menor a resistência do concreto à ação dos agentes agressivos.

As amostras são saturadas e colocadas entre duas células acrílicas, sendo que cada uma delas é preenchida com uma solução, sendo a primeira célula preenchida com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) de concentração de 0,3 N e a outra célula preenchida com uma solução de cloreto de sódio (NaCl). Os dois pólos das células são conectados à uma fonte de tensão de 60 V, e o ensaio tem duração de aproximadamente 6 h (Medeiros *et al.*, 2012).

A Figura 13 apresenta o esquema do ensaio ASTM C1202/05 (2012).

Porém, autores criticam a técnica utilizada para determinação da migração de íons cloreto pela ASTM C1202 (2012). Para Andrade (1993), a determinação da permeabilidade do concreto quanto à migração dos íons cloreto não pode ser definida baseada apenas em um ensaio que quantifica a carga passante (em Coulomb) para 6 h de ensaio, e aponta que embora o teste venha sendo cada vez mais utilizado, existem diversas incertezas quanto aos seus resultados.

**Figura 13** - Esquema do teste ASTM C1202.



Fonte: Traduzido de AASHTO Y277 (ASTM C1202) *apud* STANISH *et al.*, s.d.

Essas incertezas são apresentadas por diversos autores; Andrade (1993) apontou que na ASTM C1202 (2012) o fluxo que ocorre pode não ser apenas dos íons cloreto.

Riding *et al.* (2008) e Andrade (1993) apontaram que durante o ensaio normatizado pela ASTM 1202 (2012) a corrente tende a aumentar durante o teste, principalmente quando o concreto apresenta baixa qualidade (alta permeabilidade), devido ao aumento de temperatura do ensaio, que conseqüentemente aumenta a condutividade. Além disso, os autores apontam que enquanto os íons cloretos estão migrando, os íons de hidroxila (presentes no interior do concreto) migram para fora, mudando assim a condutividade do concreto, e conseqüentemente tornando incertos os resultados do ensaio.

A tensão aplicada no método ASTM C1202/05 para induzir a migração dos íons cloreto é de 60 V, e também é apontada como incerta e diversos autores utilizam outros valores. Medeiros *et al.* (2012) reduziram a tensão de 60 V para 30 V com o objetivo de diminuir o efeito Joule, que é uma lei física que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em um determinado tempo. Santos, em 2006, utilizou uma diferença de potencial de 10 V para a realização de seus ensaios.

Andrade e Whiting (1996) *apud* Medeiros Junior (2014), apontaram que a aplicação de uma tensão de 60 V para o tempo de ensaio de apenas 6 h, não favorece a migração de íons cloretos em condições naturais, ou seja, devido à alta tensão e

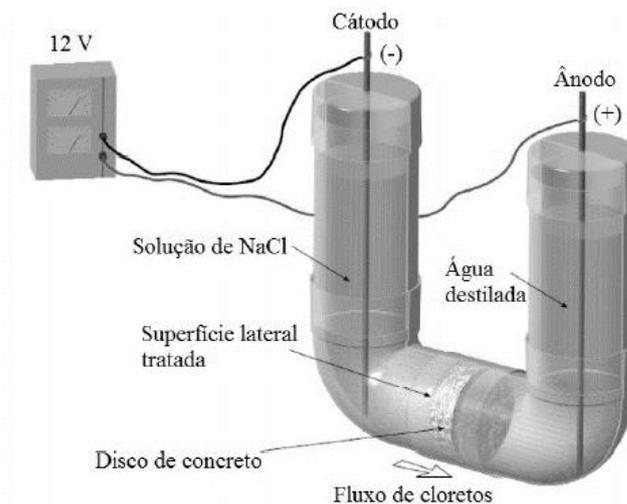
baixo tempo de ensaio os íons cloretos são induzidos a passarem de um meio para o outro.

Devido às conclusões obtidas pelos autores pesquisados, Medeiros Junior (2014) adotou uma tensão de 12 V para a realização do ensaio de migração de íons cloreto, e afirmou ainda que, um período de semanas para a realização desse ensaio é mais recomendado para obtenção de dados mais reais.

Medeiros Junior (2014) apontou que diversas variações são apresentadas quando o ensaio de migração de íons cloreto é realizado, desde a duração do ensaio, a tensão aplicada e a espessura do disco. Porém, segundo Santos (2006), o princípio e objetivo de todos eles são o de induzir e determinar a migração dos íons através do concreto sob a ação de um campo elétrico externo.

Para a realização do ensaio de migração de íons cloreto Medeiros *et al.* (2012) apud Medeiros Junior (2014) utilizaram o esquema apresentado na Figura 14.

**Figura 14** - Arranjo experimental do ensaio de migração de cloretos.



Fonte: Medeiros *et al.* (2012) *apud* e adaptado por Medeiros Junior (2014).

Segundo McGrath (1996) *apud* Medeiros Junior (2014), a espessura da amostra de concreto deve ser maior que a dimensão máxima do agregado graúdo utilizado na mistura, já que essa prática evitaria a formação de um caminho através da zona de transição utilizada para a passagem dos íons cloreto.

Santos (2006) e Medeiros Junior (2014) utilizaram no experimento de determinação da migração dos íons cloretos, na célula catódica, uma concentração de 1M de cloreto de sódio (NaCl). Na célula anódica, foi utilizado: água destilada, por Santos (2006) e água deionizada, por Medeiros Junior (2014).

Castellone *et al.* (2001) e Medeiros Junior (2014) realizaram o monitoramento das concentrações de cloretos periodicamente, no compartimento anódico, de onde foram retiradas amostras da solução e realizada uma análise por titulação com nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). Além do monitoramento por titulação os autores utilizaram um condutivímetro digital, encontrando uma correlação entre as medidas.

Castellone *et al.* (2001) apontaram que para que fosse obtido uma correlação correta entre o monitoramento das concentrações e as medidas realizadas manualmente, a água utilizada no compartimento anódico deveria ser água deionizada. A baixa condutividade inicial desta água permite detectar mais facilmente quando os íons cloretos começam a passar para o compartimento anódico.

Medeiros Junior (2014) ainda apontou que no eletrodo imerso no compartimento anódico foi observado uma corrosão, gerando óxidos de cor amarronzada. Esses óxidos são importantes para a prevenção da evolução do gás cloro (HONAVAR *et al.*, 2014 *apud* MEDEIROS JUNIOR, 2014).

Medeiros Junior (2014) identificou um comportamento semelhante em todas as amostras estudadas, em que em um determinado momento houve um crescimento da corrente elétrica até que se atingisse um valor de pico durante o ensaio, e posteriormente a corrente começou a diminuir até a sua estabilização.

O mesmo autor observou que o pico da corrente é maior em concretos com maior relação a/c, indicando que os íons encontraram mais facilidade em percorrer os concretos cuja relação a/c era maior e, conseqüentemente, mais poroso.

Medeiros Junior (2014) apontou que quando as relações a/c são fixadas e os resultados são comparados, é possível observar que a composição dos cimentos afeta a capacidade de migração dos íons cloreto. O autor apresentou em seus resultados que o cimento que apresentou menores valores de concentração de  $\text{Cl}^-$  foi o CP III 40 RS segundo NBR 5735 (ABNT, 1991a), e o que apresentou maior facilidade de migração dos íons cloretos foi o cimento CP V ARI segundo NBR 5733 (ABNT, 1991b).

Nota-se que o cimento que apresentou menor migração de íons cloreto é um cimento que apresenta adição de escória de alto forno (40% da sua composição), cimento este que é indicado para ambientes agressivos, sendo resistente a sulfatos. Por sua vez, o CPV – ARI apresenta em sua composição 95% de clínquer e é um cimento indicado quando se desejam concretos com alta resistência inicial.

O objetivo dos ensaios de migração de íons cloreto é o de determinar os coeficientes de difusão. O coeficiente de difusão destes íons é um parâmetro que pode caracterizar o desempenho do concreto a longo prazo, ou seja, a sua resistência à penetração de íons cloreto (ANDRADE, 1993).

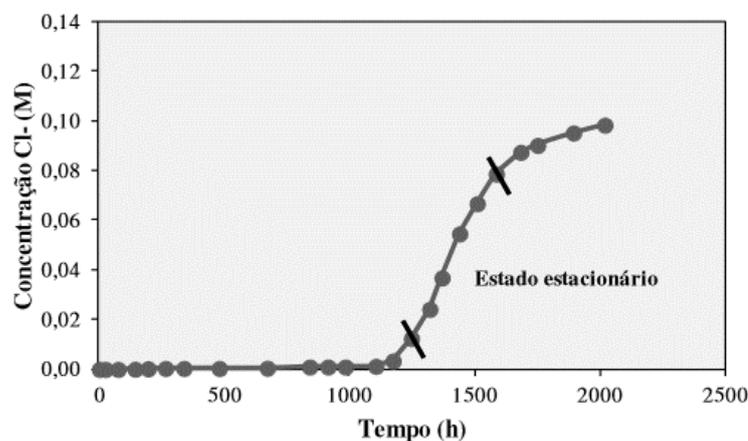
O coeficiente de difusão possui dois componentes, e esses são denominados de: coeficiente de difusão no estado estacionário, e o coeficiente de difusão no estado não estacionário. Castellone *et al.* (2001) denominaram esses coeficientes como coeficiente de difusão estacionário ( $D_s$ ) e coeficiente de difusão não estacionário ( $D_{ns}$ ).

Como demonstrado na Figura 13, Castellone *et al.* (2001) apontaram que inicialmente existe um período em que os íons cloreto passam pelo concreto, mas são valores negligenciáveis, já que corresponde ao tempo necessário para que o disco de concreto esteja saturado com os íons cloreto; esse momento é denominado como *time-lag* (ttl). Após esse período, o fluxo de íons é constante e corresponde ao estado estacionário.

Andrade (1993) afirmou que os primeiros íons cloreto que migram de uma região da amostra para a outra reagem com o aluminato tricálcico presente no interior do concreto.

Por esse motivo, Medeiros Junior (2014) afirmou que o coeficiente de difusão deve ser determinado quando há um aumento linear de cloretos no compartimento anódico, demonstrado na Figura 15.

**Figura 15** – Variação da concentração de íons cloreto na amostra com tempo de teste, sob tensão de 12 V.



Fonte: Medeiros Junior, 2014.

O autor ainda apontou que, para a determinação do coeficiente de difusão para o caso de migração de íons cloreto, há a necessidade do fluxo de íons cloreto acontecer em um estado estacionário.

Em função dos resultados obtidos, o autor determinou o coeficiente de difusão no estado estacionário e no estado não estacionário pelo método multiregime de migração de íons cloretos, descrito na norma UNE 83987 de 2012 (MEDEIROS JUNIOR, 2014). Para este trabalho serão determinados apenas os coeficientes de difusão no estado estacionário.

a) Coeficiente de difusão no estado estacionário ( $D_s$ )

Com os dados obtidos no ensaio de migração o coeficiente de difusão no estado estacionário será calculado conforme Castellone *et al.* (2001), apresentado pela Equação 3.

$$D_s = \frac{RTl}{zAF(\gamma C_{cl})\Delta\phi_{ef}} x \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

Onde:

$D_s$  = coeficiente de difusão dos cloretos no estado estacionário ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );

$R$  = constante dos gases ( $1,9872 \text{ cal}/(\text{molK})$ );

$T$  = Temperatura (K);

$l$  = espessura do disco de concreto (cm);

$z$  = valência do íon cloreto (=1);

$A$  = Área da seção do disco de concreto disponível para migração dos cloretos ( $\text{cm}^2$ );

$F$  = Constante de Faraday ( $23063 \text{ cal}/(\text{vol eq})$ );

$C_{cl}$  = concentração de cloretos na célula catódica ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ );

$\gamma$  = coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657, para cloretos);

$\Delta\phi_{ef}$  = tensão efetiva que atravessa as amostras durante o estado estacionário, monitorada durante o ensaio;

$dC/dt$  = inclinação da parte linear (estado estacionário) do gráfico: concentração de cloretos x tempo ( $\text{mol}/\text{s}$ ).

Medeiros Junior (2014) obteve diferentes resultados referentes ao coeficiente do estado estacionário. O autor apontou que quanto maior a relação a/c da mistura de concreto, maior o coeficiente de difusão. Medeiros Junior (2014) ainda afirmou que diferentes tipos de cimento também afetam os valores obtidos dos coeficientes, por exemplo, o coeficiente no estado estacionário utilizando concreto com cimento CP III RS 40 foi cerca de 9 vezes menor do que o coeficiente do estado estacionário do concreto utilizando cimento CP V ARI.

Como resultado do trabalho de Medeiros Junior (2014) para o traço produzido com CP V ARI e relação a/c de 0,6, o coeficiente do estado estacionário obtido foi de  $6,0E-08 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho o material utilizado foi caracterizado no Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas. Baseado em suas características foram desenvolvidos os traços conforme o método de dosagem IPT. Após a definição das proporções de mistura de concreto, os corpos de prova foram moldados e ensaiados conforme descrito no delineamento experimental.

### 5.1 Caracterização do material

Para o presente trabalho, foram utilizados o agregado miúdo natural, areia proveniente de rio, e quatro diferentes tipos de agregado graúdo, cujas nomenclaturas e constituição são apresentadas a seguir:

- agregado graúdo natural beneficiado (AN) de origem basáltica;
- agregado graúdo de concreto, denominado como ARCO – agregado produzido no Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas pelo processo de britagem de corpos de prova de concretos com classes de resistência entre 30 a 50 MPa, ou seja, 100% da sua composição é proveniente de concreto;
- agregado graúdo cimentício, denominado como ARCI – agregado proveniente de uma usina recicladora, localizada em Barão Geraldo - Campinas, que apresenta em sua fração graúda mais do que 90% de material cimentício e rochas e;
- agregado graúdo cimentício tratado, denominado ARCI tratado – agregado cimentício que passou por um tratamento, conforme Perea e Alvarado (2015), descrito posteriormente no item 5.1.1.

Para a dosagem dos traços de concreto foi utilizado o cimento CP-V ARI segundo NBR 5733 (ABNT, 1991), por não conter adições pozolânicas e apresentar uma rápida hidratação da mistura. O objetivo de utilização do CP-V ARI foi o de minimizar os efeitos causados pelo cimento, se fosse utilizado um cimento com adições o mesmo poderia modificar e melhorar as características finais do concreto, comprometendo assim, o real efeito causado pela utilização dos agregados reciclados.

O cimento utilizado foi proveniente de apenas um fornecedor e de um mesmo lote. A Tabela 7 apresenta as características do cimento utilizado.

**Tabela 7 - Características do cimento utilizado.**

<b>Características físicas e mecânicas</b>									
	Finura			Tempo de Pega (min)		Resistência à compressão (MPa)			
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	Início de Pega (min)	Fim de Pega (min)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Exigência	≥ 3000	≤ 6,0	—	≥ 60	≤ 600	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	—
Média	4621	0,2	1,8	191	288	20,7	36,7	43,1	—
Desvio Máx.	90,66	0	0,32	6,46	7,95	0,8	0,7	0,71	—
<b>Características químicas</b>									
	MgO (%)	SO <sub>3</sub> Média (%)		Perda ao fogo média (%)	Resíduo insolúvel (%)				
Exigência	≤ 6,5	≤ 3,5 ou ≤ 4,5		≤ 4,5	—				
Média	3,6	3,9		3,4	—				
Desvio Máx.	0,22	0,1		0,17	—				

Fonte: Intercement, sd.

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente da empresa que é responsável pelo abastecimento no município de Campinas-SP, a SANASA.

O aditivo usado foi o ADVACAST 525, um superplastificante à base de policarboxilato, que tem como objetivo dar trabalhabilidade ao concreto sem causar segregação.

A proposta do uso do agregado reciclado tratado tem como objetivo a redução da sua capacidade de absorção de água e está descrito no item 5.1.1.

Para reduzir a quantidade de finos nos agregados graúdos reciclados, estes foram secos durante 16 h em estufa e, em seguida, foram submetidos a um peneiramento em uma mesa vibratória com a frequência de 60 Hz; a peneira usada tinha abertura de 1,2 mm. Os finos foram descartados, e apenas o que ficou retido na peneira de abertura de 1,2 mm foi utilizado para a produção do concreto.

A Figura 16 apresenta os agregados graúdos utilizados neste trabalho.

**Figura 16** - Agregados graúdos utilizados.



AN



ARCO



ARCI



ARCI Tratado

Fonte: da autora, 2016.

#### 5.1.1. Procedimento de produção do ARCI Tratado

Após a adequação da granulometria para eliminação de partículas menores que 1,2 mm, parte do ARCI recebeu uma impregnação de uma solução de água e cimento na proporção de 45 kg de cimento por metro cúbico de agregado reciclado a ser tratado. Para a determinação da quantidade de água para a mistura multiplicou-se a capacidade de absorção de água do ARCI, pela quantidade de agregado a ser tratado, o que resultou na quantidade de água usada na preparação da solução e que foi integralmente absorvida pelo agregado.

Para a execução do tratamento, a água e o cimento foram misturados na betoneira por 15 s; depois adicionou-se o agregado reciclado ARCI misturando-o por mais 120 s. Após a mistura o agregado reciclado tratado foi mantido em cura em um saco plástico fechado por 28 dias antes da sua utilização, sendo que 24 h após o tratamento os sacos foram revolvidos para evitar empolamento de partículas. Este procedimento foi relatado por Perea e Alvarado (2015).

O objetivo do tratamento realizado era o de diminuir a porosidade do agregado cimentício e diminuir a sua capacidade de absorção de água, diminuindo consequentemente a capacidade de absorção de água do concreto.

### 5.1.2. Caracterização dos agregados

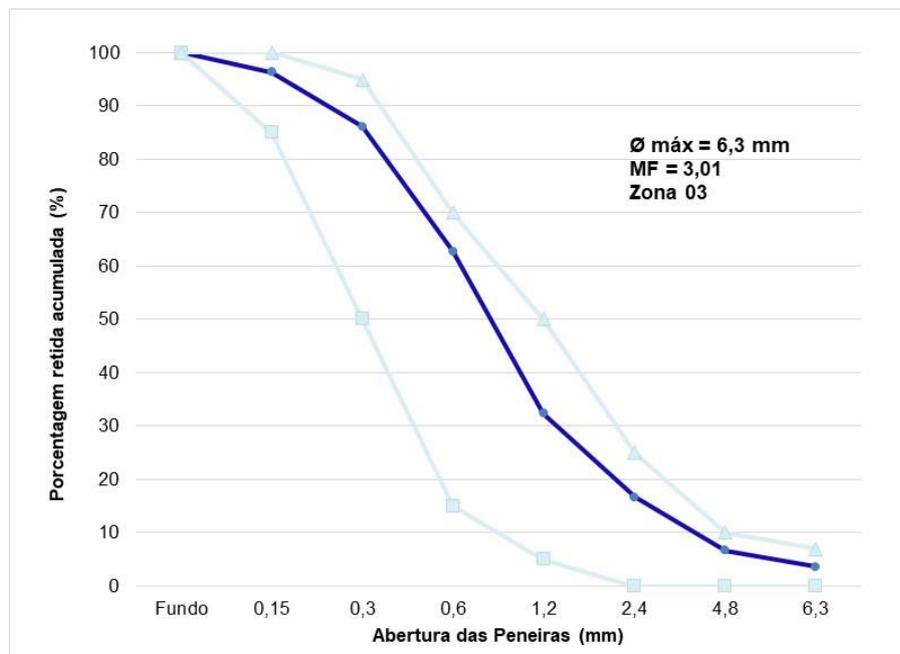
As características dos agregados foram determinadas conforme ensaios relacionados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Procedimentos ABNT para caracterização dos agregados.

<b>Característica</b>	<b>Miúdo</b>	<b>Graúdo</b>
Granulometria	NBR NM 248:2003	NBR NM 248:2003
Massa Específica	NBR NM 52:2009	NBR NM 53:2009
Capacidade de absorção de água	NBR NM 52:2009	NBR NM 30:2001
Resistência ao esmagamento	–	NBR 9938:2013
Determinação da composição dos agregados por análise visual	–	NBR 15116:2004 (Anexo A)

Fonte: da autora, 2017.

A Figura 17 mostra a curva granulométrica da areia, que apresenta como característica seu diâmetro máximo de 6,3 mm, com módulo de finura igual a 3,01 enquadrando-se na Zona 03 da NBR 7211 (ABNT, 2009c), sendo classificada então, como areia grossa (agregado na zona utilizável superior). Nota-se na Figura 17 que a areia utilizada neste trabalho apresenta granulometria contínua, apresentando partículas de diferentes tamanhos, preenchendo, assim, todos os espaços.

**Figura 17** – Curva granulométrica – agregado miúdo

Fonte: da autora, 2016.

Além da classificação granulométrica foram determinadas a massa específica e a capacidade de absorção de água do agregado miúdo (Tabela 9).

**Tabela 9** - Resultados das características do agregado miúdo

Agregado miúdo	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Classificação	Absorção de água (%)
		Zona 03	
Areia natural	2,52	(Areia grossa)	2,76

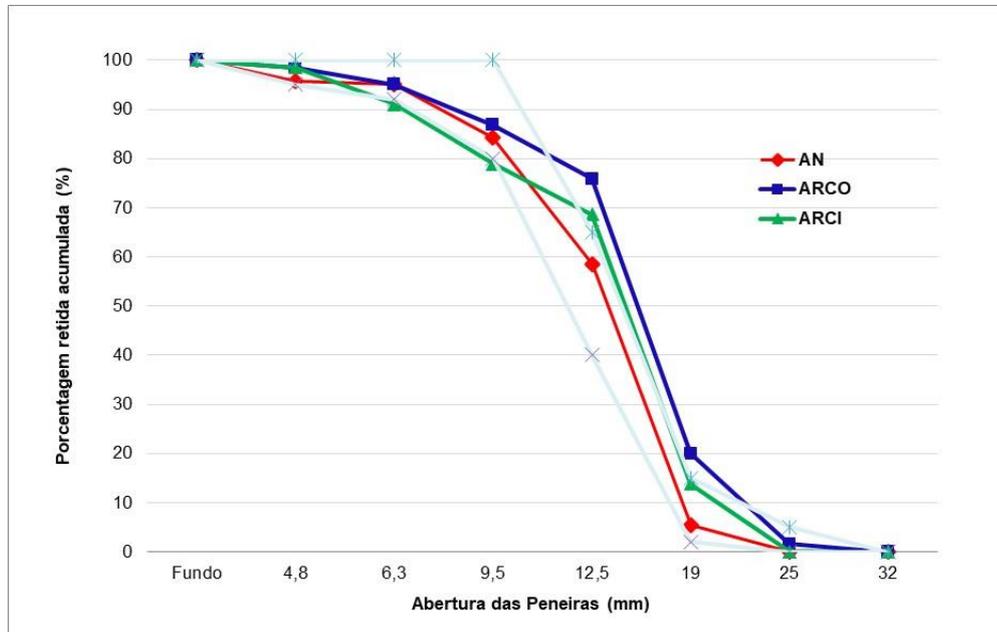
Fonte: da autora, 2016.

Para os agregados graúdos, primeiramente foi realizado o ensaio de granulometria, sendo eles o agregado graúdo natural (AN); o agregado graúdo de concreto (ARCO); e o agregado graúdo cimentício (ARCI). Para o agregado graúdo cimentício tratado (ARCI Tratado), não foi realizado o ensaio de granulometria, já que esse possui a mesma composição granulométrica que o agregado graúdo cimentício, diferenciando-se apenas pela fina camada de nata de cimento aplicada como tratamento para diminuir a capacidade de absorção de água do agregado.

O diâmetro máximo obtido para os três tipos de agregados foi de 25 mm. Nota-se na Figura 18, que apresenta as curvas granulométricas dos agregados graúdos,

que assim como a areia, os agregados graúdos apresentaram um resultado de graduação contínua, em que todos os espaços presentes são preenchidos pelos diferentes tamanhos de partículas.

**Figura 18** - Curva granulométrica - Agregados graúdos



Fonte: da autora, 2016.

Para os agregados graúdos, além dos resultados referentes à granulometria, também foram obtidos os resultados de massa específica, absorção de água, e resistência ao esmagamento de cada tipo de agregado. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos.

O ensaio de resistência ao esmagamento, realizado conforme a NBR 9938 (ABNT, 2013), apresenta, em porcentagem, diferentes resultados para os tipos de agregados graúdos utilizados neste trabalho. Como era esperado, o agregado graúdo natural, a brita, apresenta uma resistência ao esmagamento maior quando comparada aos agregados reciclados, característica essa que afeta diretamente a resistência à compressão do concreto. Quando comparados os três tipos de agregados reciclados, ARCO, ARCI e ARCI Tratado, o que apresentou menor resistência ao esmagamento foi o agregado reciclado de concreto (ARCO). Porém, os resultados de resistência ao esmagamento dos agregados reciclados foram muito similares quando comparados entre si.

**Tabela 10** - Resultados das características dos agregados graúdos

Agregado Graúdo	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Esmagamento (%)
Natural	2,87	1,35	14,36
ARCO	2,36	7,34	25,79
ARCI	2,41	7,35	24,50
ARCI TRATADO	2,42	6,75	24,24

Fonte: da autora, 2017.

Como resultado ao tratamento realizado no agregado reciclado cimentício, cujo objetivo era o de diminuir a capacidade de absorção de água desse agregado, verifica-se na Tabela 10 que o tratamento utilizado preencheu parte dos poros do agregado reciclado e, conseqüentemente, diminuiu a sua capacidade de absorção de água, como se era esperado. A diminuição na capacidade de absorção de água do ARCI pode não ter sido significativa, mas demonstra que através de tratamentos e cuidados realizados na preparação do agregado reciclado é possível modificar as suas características e com isso melhorá-las, e como consequência, ampliar o consumo do mesmo.

## 5.2 Estudo de dosagem

O traço referência foi desenvolvido utilizando o método IPT (HELENE; TERZIAN, 1992), para uma classe de resistência de 30 MPa. Os cálculos para a obtenção do traço final estão apresentados no Apêndice A deste trabalho.

Na sequência, foram determinadas as porcentagens de substituição a serem utilizadas. Estas foram definidas baseadas em normas estrangeiras que permitem a substituição dos agregados naturais por agregados graúdos em valores que variam entre 20 e 30%, dependendo do tipo de agregado, e da resistência do concreto que se pretende produzir. As nomenclaturas adotadas e as porcentagens de substituição são apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11** - Definição dos traços.

Traço	Agregado graúdo utilizado	Porcentagem de substituição
T REF	AN	0
T 20 ARCO	ARCO	20%
T 20 ARCI	ARCI	20%
T 20 ARCI Tratado	ARCI Tratado	20%
T 30 ARCO	ARCO	30%
T 30 ARCI	ARCI	30%
T 30 ARCI Tratado	ARCI Tratado	30%

Fonte: da autora, 2016.

Para que a consistência do concreto de 6,5 cm fosse mantida, adotou-se se o uso de aditivo superplastificante. A relação água/cimento foi mantida constante.

Para os traços que utilizavam agregado reciclado, devido à sua capacidade de absorção de água ser maior do que a do agregado natural (AN), foi realizada uma pré-saturação antes do processo de mistura, para que a água de amassamento não fosse absorvida pelo agregado reciclado gerando perda de consistência do concreto. O agregado reciclado foi pré-saturado em 70% da sua capacidade de absorção de água, e essa água utilizada no procedimento não foi retirada da relação a/c (VERAS, 2012).

A Tabela 12 apresenta o traço referência desenvolvido pelo método IPT e os traços com 20 e 30% de substituição do AN pelos agregados reciclados.

Cabe salientar que, para a definição da quantidade em massa da substituição do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado, houve uma correção em função da diferença das respectivas massas específicas.

Para os traços desenvolvidos e apresentados na Tabela 12, o concreto atende as classes de agressividade 1 e 2 da norma NBR 12655 (ABNT, 2015). Visto que o valor da relação a/c é inferior a 0,6, o consumo de cimento de 308,5 kg/m<sup>3</sup> é superior ao mínimo exigido para essas duas classes e a classe de resistência do concreto de 30 MPa que foi adotada, também atende aos valores mínimos especificados pela norma para cada classe de resistência.

**Tabela 12** – Traço unitário dos concretos em massa.

Traço	Teor Subst.	Cimento	Areia	Brita	AGR	a/c	Adt (%)	Cc (kg/m <sup>3</sup> )
T REF	0	1	2,71	3,79	0	0,6	0,4	308,5
T ARCO	20%	1	2,71	3,03	0,67	0,6	0,3	308,5
	30%	1	2,71	2,65	1,00	0,6	0,4	308,5
T ARCI	20%	1	2,71	3,03	0,68	0,6	0,6	308,5
	30%	1	2,71	2,65	1,02	0,6	0,3	308,5
T ARCI	20%	1	2,71	3,03	0,68	0,6	0,4	308,5
Tratado	30%	1	2,71	2,65	1,02	0,6	0,5	308,5

AGR: Agregado graúdo Reciclado; a/c: Relação a/c; Adt: Aditivo; Cc: Consumo de Cimento  
 Fonte: da autora, 2016.

### 5.3 Métodos de ensaio

O comportamento dos concretos produzidos foi analisado no estado plástico, avaliando-se a consistência e a massa específica. No estado endurecido foram executados os ensaios apontados na Tabela 13, para os corpos de prova que saíram da câmara úmida após 7 e 28 dias e para os corpos de prova que ficaram expostos à intempérie e imersos em solução salina.

Parte dos corpos de prova foi retirada da câmara úmida aos 28 dias de idade e seguiu exposta às intempéries até a idade do ensaio, 90 dias, 180 dias e 210 dias. O restante dos corpos de prova foram retirados aos 28 dias da câmara úmida, foram secos em estufa durante 48 h e imersos em solução salina com concentração de 4% de NaCl, durante 180 dias.

Os resultados obtidos através dos ensaios normatizados (resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e capacidade de absorção de água por imersão) foram analisados por MANOVA, descrito no item 5.3.2.1. A análise de variância teve por objetivo avaliar a influência da substituição do agregado natural por agregados reciclados (ARCO, ARCI e ARCI Tratado) na durabilidade do concreto.

**Tabela 13** – Quantidade de corpos de prova

Ensaio	Idades (dias)					
	7	28	91	180	180 dias em imersão salina	210 dias
Resistência à compressão axial (CP 10 x 20 cm)	3	3	3	3	3	–
Módulo de elasticidade (CP 10 x 20 cm)	–	2	2	2	2	–
Capacidade de absorção de água por imersão (CP 10 x 20 cm)	–	3	3	3	3	–
Capacidade de absorção de água por capilaridade (CP 10 x 20 cm)	–	3	3	3	3	–
Penetração de íons cloreto (CP 10 x 20 cm)	–	–	–	–	2	–
Permeabilidade ao ar e a água ( <i>Poroscope</i> ) (CP 10 x 10 x 40 cm)	–	–	–	–	–	1 prismático
Carbonatação (CP 10 x 20 cm)	–	–	–	–	2	–
Migração de íons cloreto (CP 10 x 20 cm)	–	–	–	–	–	3

Fonte: da autora, 2016.

### 5.3.1 Características no estado plástico

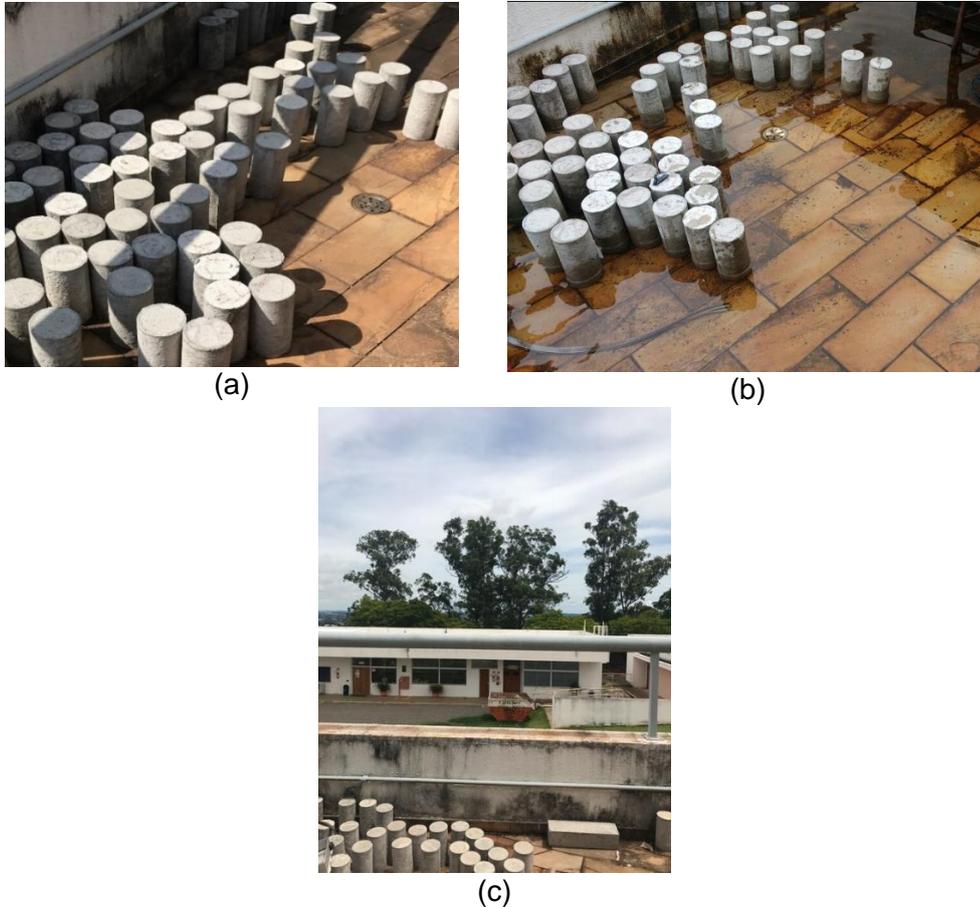
Para a determinação das características dos concretos no estado plástico foram realizados, no momento da mistura, a determinação da consistência (*slump test*) e a determinação da massa específica, conforme as NBR NM 67 (ABNT, 1998) e NBR 9833 (ABNT, 2009d), respectivamente.

### 5.3.2. Características no estado endurecido

Após a produção dos traços de concreto e moldagem dos corpos de prova, estes foram colocados em câmara úmida por 28 dias para o processo de cura. Após este período, parte dos corpos de prova foi exposta às intempéries do meio, ou seja, foram expostos ao Sol, à chuva, à exposição de gases e líquidos que pudessem

modificar a estrutura do concreto, até as idades de ensaio (91 e 180 dias). O local onde os corpos de prova ficaram expostos estão apresentados na Figura 19.

**Figura 19** - CPs expostos às intempéries: (a) Sol; (b) após a chuva; (c) fotografia do local exposto.



Fonte: da autora, 2017.

Outra parte dos corpos de prova foi colocada em ambiente agressivo, 180 dias em imersão salina, com o objetivo de simular uma exposição em ambiente marítimo. Porém, vale ressaltar que a exposição em solução salina não pode ser comparada à água do mar, já que a mesma apresenta inúmeras substâncias químicas e biológicas, além do sal normalmente presente.

Os ensaios para a determinação das características físicas e mecânicas do concreto foram realizados após 7, 28, 91, 180 dias.

Tal exposição foi realizada para que ocorresse um processo de ataque ao concreto, promovendo uma situação mais próxima possível da exposição a qual uma estrutura de concreto armado teria no meio ambiente em que a mesma seria construída.

Para a determinação das características mecânicas do concreto, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios laboratoriais normatizados apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14** - Ensaios normatizados realizados nos corpos de prova

Ensaios normatizados	Norma
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739 (2007)
Módulo de Elasticidade	ABNT NBR 8522 (2008)
Capacidade de absorção de água por imersão	ABNT NBR 9778 (2005)
Capacidade de absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779 (2012)

Fonte: da autora, 2016.

Para avaliação do comportamento do concreto frente ao ataque químico, a metodologia utilizada neste trabalho foi baseada em Omrane *et al.* (2017), na qual os corpos de prova foram secos após 28 dias de cura em câmara úmida e, em seguida, colocados por 180 dias submersos em solução salina com concentração de 4% de NaCl. A Figura 20 apresenta os CPs imersos em solução salina. A solução utilizada durante os 180 dias não foi renovada. O volume de líquido utilizado dentro dos recipientes foi quatro vezes maior do que o volume dos CPs que foram colocados nos recipientes.

**Figura 20** - Fotografia dos corpos de prova imersos em solução salina (período de 180 dias).



Fonte: da autora, 2017.

Os CPs expostos ao meio ambiente ou submersos em solução salina foram ensaiados aos 91 e 180 dias, no caso de exposição ao meio ambiente, e 180 dias, no

caso dos que ficaram submersos em solução salina. Além dos ensaios normatizados, citados na Tabela 14, foram realizados ensaios não normatizados, que visam à determinação dos parâmetros que afetam a durabilidade dos concretos descritos no item 5.3.3.

5.3.2.1 Análise das características físicas e mecânicas do concreto no estado endurecido.

Para a realização da análise estatística das características físicas e mecânicas dos concretos foram realizados alguns procedimentos. Primeiramente, para verificar se as características dos dados atendem as premissas para a MANOVA (Multivariate Analysis of Variance), foram avaliadas a normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett.

Através desses testes, foi possível analisar os dados obtidos nos ensaios, onde o nível de significância considerado foi de 5%. Os dados que apresentaram *p-value* maiores que  $\alpha=0,05$  estavam aptos para serem inseridos na análise estatística.

Para as variáveis que apresentaram *p-value* menor que  $\alpha (0,05)$ , ou seja, variáveis inaptas que não atendem às premissas da MANOVA, foi necessário utilizar o método Box-Cox para transformá-las e tentar inseri-las nas análises. A transformação das variáveis foi realizada e submetida a novos testes (teste de normalidade e teste de homogeneidade) para serem classificadas como aptas, ou seja, para que pudessem atender às premissas do MANOVA, ou inaptas, aquelas que não atendessem as premissas (homogeneidade e normalidade dos dados) para o MANOVA.

A análise multivariada de variância (MANOVA) foi realizada para cinco situações, sendo elas:

- 1) T REF *versus* T 20 ARCO *versus* T 30 ARCO;
- 2) T REF *versus* T 20 ARCI *versus* T 30 ARCI;
- 3) T REF *versus* T 20 ARCI TRATADO *versus* T 30 ARCI TRATADO;
- 4) T REF *versus* T 20 ARCO *versus* T 20 ARCI *versus* T 20 ARCI TRATADO;
- 5) T REF *versus* T 30 ARCO *versus* T 30 ARCI *versus* T 30 ARCI TRATADO.

Ou seja, as análises realizadas foram referentes primeiramente aos teores de substituição, comparando os traços com mesmo tipo de agregado e diferentes teores

de substituição em relação ao traço referência. Em seguida, foram realizadas as análises quanto ao tipo de agregado, onde o teor de substituição permaneceu o mesmo e traços com diferentes tipos de agregados foram comparados ao traço referência.

Foi realizado também o teste multivariado, que avalia se o MANOVA foi estatisticamente significativo, ou seja, ele valida o método e os resultados. Nesse caso, foram utilizados três métodos de confirmação, sendo eles: Pillai's Trace, Wilks Lambda e Roy's Largest Root.

Esta análise foi realizada para as características mecânicas dos concretos produzidos nas idades de 7, 28, 90, 180 dias, e 180 dias após imersão em solução salina.

### 5.3.3. Ensaio indiretos para determinação da durabilidade dos concretos

Foi avaliada a capacidade de penetração e transporte de substâncias no interior do concreto, que é determinante para a durabilidade do concreto. Este parâmetro foi medido por meio da determinação da capacidade de absorção de água por imersão e por capilaridade, além de outros quatro ensaios indiretos.

#### a) Determinação da velocidade de carbonatação

Para o ensaio de carbonatação, os corpos de prova foram cortados, por uma máquina policorte, após 180 dias expostos às intempéries do meio. A Figura 21 apresenta os corpos de prova cortados ao meio.

**Figura 21** - Fotografia das amostras para ensaio de carbonatação.



Fonte: da autora, 2017.

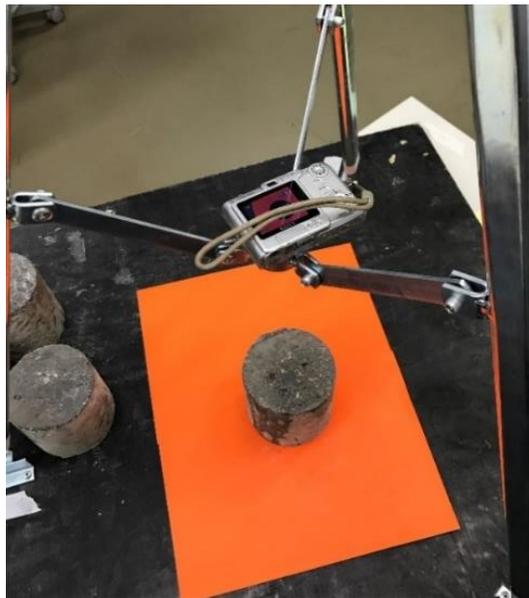
Após o corte dos CPs, conforme apresentados na Figura 21, as amostras foram colocadas durante 48 h em estufa para retirar a umidade presente nas mesmas. Na

sequência, foi aspergida uma solução de fenolftaleína com concentração de 1% sobre a superfície de corte; após a aspersão foram tiradas fotos com o objetivo de analisá-las e determinar a profundidade de carbonatação do concreto por meio de imagens.

Após a aspersão da fenolftaleína os CPs foram fotografados com a câmera fotográfica de marca CyberShot a uma distância padronizada de 31 cm em um tripé, conforme a Figura 22.

As fotografias foram analisadas pelo programa AutoCAD®.

**Figura 22** - Aparato para a realização das fotografias.



Fonte: da autora, 2017.

Em função da área carbonatada ( $A_{\text{carbonatada}}$ ) foi obtida a espessura média de carbonatação, com o auxílio da Equação 4.

$$A_{\text{carbonatada}} = A_{10} - A(10 - e) \quad (4)$$

Onde:

$A_{10}$  = área do círculo (corte do corpo de prova com diâmetro de 10 cm);

$A(10 - e)$  = área do círculo descontando-se a espessura carbonatada;

Com a área carbonatada obtida na Equação 4, foi definida a equação de segundo grau (Equação 5) dada por:

$$0,786e^2 - 15,71e + A_{\text{carbonatada}} = 0 \quad (5)$$

Onde a espessura foi definida através da aplicação de Bhaskara.

b) Determinação da penetração de íons cloreto

Após 180 dias, os corpos de prova imersos em solução salina foram cortados ao meio, repetindo-se o procedimento realizado para a determinação da carbonatação do concreto. Os cortes realizados nos corpos de prova para a produção das amostras utilizadas para a determinação da profundidade de penetração de íons cloreto é o mesmo dos cortes realizados para o ensaio de profundidade de carbonatação, conforme Figura 21.

Após o corte dos corpos de prova, as amostras foram colocadas em estufa durante 48 h para que ficassem secas para a realização do ensaio, após atingirem a temperatura ambiente, foi aspergida sobre a superfície dos cortes uma solução de nitrato de prata de 0,3 M.

Como apresentado na revisão de literatura, os trabalhos utilizam a solução de nitrato de prata em uma concentração de 0,1 M. Porém, devido a testes realizados anteriormente, e a dificuldade na identificação da mudança de cor, para esse trabalho a concentração de nitrato de prata utilizado para aspersão no concreto e determinação da penetração de íons cloreto foi de 0,3 M.

Para que a solução de nitrato de prata secasse, e fosse possível analisar melhor os resultados, as fotografias desse ensaio foram tiradas após 24 horas da aspersão com a mesma máquina fotográfica apresentada anteriormente e utilizando o aparato da Figura 22.

A análise de imagens para o ensaio de determinação da penetração de íons cloreto foi realizada com o auxílio do programa AutoCAD®.

c) Determinação da Permeabilidade superficial do concreto ao ar

Aos 210 dias, os concretos foram ensaiados para determinação da sua permeabilidade superficial com a utilização do equipamento *Poroscope*. O ensaio foi executado em corpos de prova prismáticos.

Para a determinação da permeabilidade, uma célula foi fixada no corpo de prova com uma morsa como apresentado pela Figura 23.

O ar foi injetado no concreto a partir de um dispositivo (indicada pela seta vermelha na Figura 23), criando um vácuo com pressão igual ou superior a 55 kPa. O temporizador do equipamento determina o tempo necessário para que a pressão diminuísse para 50 kPa.

**Figura 23** – Fixação dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade.



Fonte: da autora, 2017.

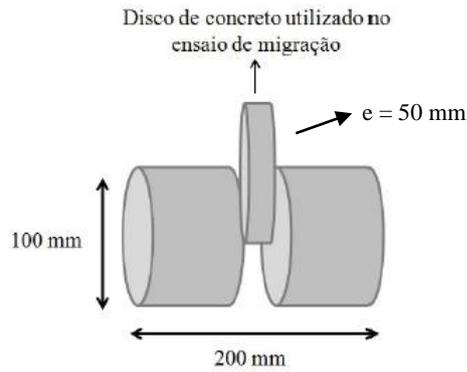
A permeabilidade é determinada a partir do tempo em que o ar, ou a água, demoram para percorrer o interior do concreto. Conforme o manual do equipamento determina-se uma classificação do concreto quanto à sua permeabilidade, apresentada na Tabela 5 (página 35).

#### d) Migração de íons cloreto

Para esse ensaio foram produzidos dois corpos de prova cilíndricos (diâmetro de 100 mm x 200 mm de comprimento) por traço. Foram retiradas amostras de 50 mm de espessura dos corpos de prova utilizando uma poliacorte, como mostra a Figura 24.

Conforme a ASTM C1202 (2012) recomenda, as amostras de concreto devem passar por um processo de saturação de água a vácuo, porém não foi possível obter esse equipamento. Assim, como feito por Medeiros Junior (2014), as amostras foram saturadas cinco dias antes da sua utilização por meio da imersão das mesmas em um recipiente contendo água, para que assim fosse garantida a saturação total das amostras.

**Figura 24** - Esquema do corte do disco de concreto no corpo de prova.



Fonte: Medeiros Junior, 2014.

As células de migração foram montadas em tubos de PVC, já que se trata de um material resistente a meios agressivos (RIBEIRO *et al.*, 2012 *apud* MIRANDA JUNIOR, 2014). A Figura 25 apresenta a preparação dos tubos de PVC.

**Figura 25** – Preparação das células para ensaio de migração.: (a) corte dos tubos de PVC; (b) colagem dos tubos; (c) furos na tampa; (d) corte das amostras; (e) colagem da amostra no tubo; (f) amostra colada.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: da autora, 2017.

Foram montadas células de migração, conforme a Figura 12, nas quais em um dos compartimentos foi colocada água deionizada, e no outro uma solução com 1 M de NaCl. Uma diferença de potencial de 12 V foi aplicada por uma fonte de tensão externa, ligada por eletrodos com comprimento de 40 cm. Após a realização do teste inicial foram montadas duas células de migração por traço (7 traços), totalizando assim 14 células de migração de íons cloreto.

Após a preparação dos tubos de PVC o ensaio foi montado conforme a Figura 26.

**Figura 26** – Aparato para ensaio de migração de íons cloreto.



Fonte: da autora, 2017.

Para a realização das medições neste trabalho, a condutividade foi monitorada por um Condutímetro Digital Portátil tipo caneta, modelo CD-880, da marca Instrutherm, o mesmo tipo de equipamento utilizado por Medeiros Junior (2014) e apresentado na Figura 27. A medição foi efetuada no compartimento anódico.

Assim como Medeiros Junior (2014), além da concentração de cloretos no compartimento anódico, também foram monitoradas a temperatura, a corrente elétrica e o tempo necessário para que as soluções estivessem estabilizadas quimicamente. Todos os dados foram coletados por sensores e controlados por uma placa arduino, a qual coleta os dados e transmite para um cartão de memória.

O microcontrolador Arduíno MEGA (A) ficou responsável pela automatização, através de comandos pré-programados, de todo o processo de mensuração das grandezas descritas.

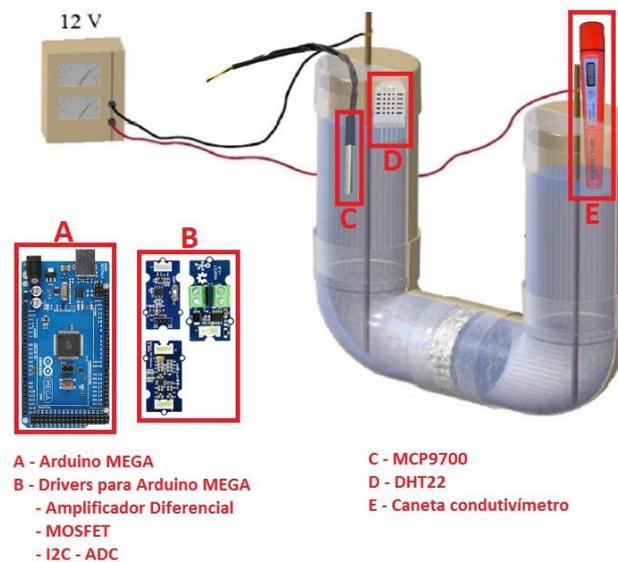
Atuando junto a ele, encontram-se os *drivers* para Arduíno (B):

- Sensor de corrente;
- Seletor de canal;
- Saídas digitais: dispositivo utilizado para escolher o canal.

O sistema de aquisição seleciona o canal por meio das saídas digitais, e o cartão SD armazena esses dados, que são disponibilizados em uma planilha Excel.

A Figura 27 apresenta os sensores utilizados para a coleta de dados.

**Figura 27** - Esquema utilizado para a coleta de dados.



Fonte: Adaptação de Medeiros Junior (2014).

A leitura da condutividade elétrica foi realizada utilizando uma Caneta Condutímetro (E). O MCP 9700 (C) mediu constantemente a temperatura interna do líquido e o DHT22 (D) mediu a umidade e temperatura acima do nível do líquido.

Os sensores C e D medem os sinais referentes as grandezas e enviam para a placa Arduíno Mega por meio das saídas dos drivers I2C, os amplificadores diferenciais expandem o sinal, possibilitando, assim, o processamento desses sinais coletados.

Após a determinação da migração de íons cloreto foram calculados o coeficiente de difusão no estado estacionário conforme Equação 3.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Característica do concreto no estado fresco

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos do concreto no estado fresco.

**Tabela 15** - Característica do concreto no estado fresco.

Traço	Teor de Substituição	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Slump Test (cm)
T REF	0	2,50	6,5
T ARCO	20%	2,47	7,5
	30%	2,44	6,5
T ARCI	20%	2,41	7,5
	30%	2,44	7,0
T ARCI Tratado	20%	2,44	6,5
	30%	2,37	6,5

Fonte: da autora, 2016.

Como observado os traços de concreto apresentam densidade similares entre si, estando em torno de 2,40 g/cm<sup>3</sup> podendo, assim, serem considerados concretos normais, nem leves (< 2,0 g/cm<sup>3</sup>) e nem pesados (> 3,0 g/cm<sup>3</sup>).

Quando comparados os resultados, o concreto T REF apresentou densidade maior do que os demais concretos, podendo significar que, apresenta menor quantidade de vazios do que os demais traços. Ou seja, para esse estudo, os traços utilizando agregado reciclado apresentam maior quantidade de vazios que são preenchidos com ar, tornando o concreto que utiliza agregado reciclado, mais poroso do que o concreto convencional.

A densidade obtida para cada traço de concreto também pode estar diretamente ligada a massa específica do agregado graúdo. A Tabela 10 apresenta os resultados de massa específica dos agregados graúdos, e vale ressaltar que o agregado graúdo natural obteve uma massa específica de 2,87 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que, os agregados graúdos reciclados apresentaram massa específica em torno de 2,40 g/cm<sup>3</sup>. Esses resultados podem justificar o peso dos concretos.

## 6.2 Características mecânicas do concreto no estado endurecido

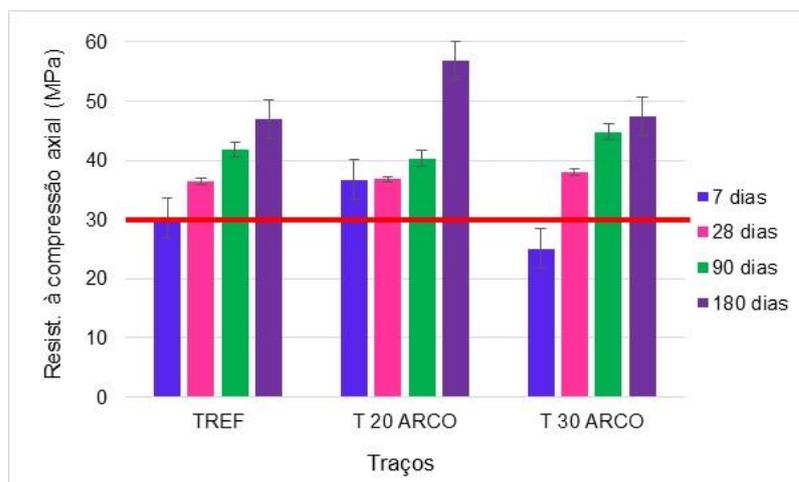
### 6.2.1 Análise 1 – T REF versus T 20 ARCO versus T 30 ARCO;

#### a) Resistência à Compressão Axial

Para a resistência à compressão axial os resultados foram comparados quanto ao teor de substituição do agregado natural pelo ARCO, sendo eles de 0, 20% e de 30%.

A Figura 28 apresenta os resultados médios de resistência à compressão axial aos 7, 28, 90 e 180 dias dos traços utilizados para a análise 1.

**Figura 28** – Resultados da resistência à compressão axial – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

A partir análise estatística realizada, verificou-se que para a idade de 7 dias existe diferença significativa entre os traços T 20 ARCO e o traço T 30 ARCO, sendo que, a resistência a compressão axial do T 30 ARCO é inferior a obtida pelo T 20 ARCO. Porém, esse comportamento não foi observado para idades mais avançadas.

Aos 28 dias não existe diferença estatisticamente significativa entre os traços T REF, T 20 ARCO e T 30 ARCO.

Aos 90 dias, a resistência à compressão axial apresenta diferenças estatisticamente significativas entre os traços T REF e T 20 ARCO quando comparadas ao traço T 30 ARCO. Nesse caso, os resultados obtidos para o T 30 ARCO foram superiores aos do T REF e T 20 ARCO.

Porém, aos 180 dias, o T 20 ARCO apresentou um ganho de resistência acima do esperado, o que implicou que seus resultados fossem estatisticamente superiores aos traços T REF e T 30 ARCO.

O aumento da resistência à compressão axial do concreto T 20 ARCO quando comparados aos demais concretos desta análise, pode ser explicado pela forma que este agregado reciclado apresentou, por sua granulometria ou até mesmo pela maneira que foi realizada a vibração dos corpos de prova. Através da curva granulométrica dos agregados graúdos, apresentada na Figura 18, é possível notar que o agregado reciclado de concreto apresentou uma composição mais graúda e mais distribuída que o agregado natural, o que pode explicar o aumento de resistência.

Para a análise 1, referente ao teor de substituição de 0, 20% e de 30% do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto produzido em laboratório (ARCO) pode-se observar que, referente à variável resistência à compressão axial os traços produzidos com agregado reciclado (T 20 ARCO e T 30 ARCO) apresentaram bom desempenho quando comparados ao T REF.

O T 20 ARCO apresentou comportamento similar ao T REF aos 7, 28 e 90 dias, e aos 180 dias apresentou resultados superiores do que o T REF.

O T 30 ARCO também apresentou resultados similares ao T REF nas idades de 7, 28 e 180 dias, sendo que aos 90 dias apresentou resultados superiores ao T REF e ao T 20 ARCO.

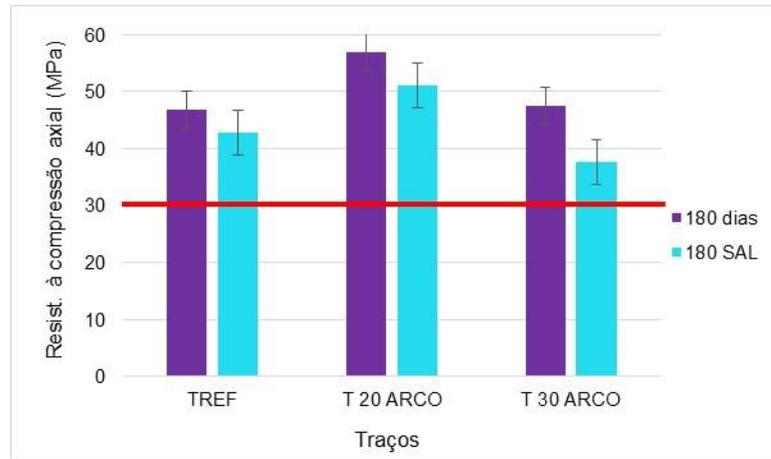
A Figura 29 apresenta a comparação da resistência à compressão axial dos corpos de prova que ficaram expostos às intempéries por 180 dias em relação aos que foram submersos durante 180 dias em solução salina. Pode-se observar que para todos os traços houve uma queda da resistência à compressão axial do concreto quando exposto à solução salina.

Assim como quando feita a análise para a idade de 180 dias, a resistência à compressão axial após 180 dias em imersão salina não apresentou diferenças significativas entre T REF e T 30 ARCO.

Porém, quando a comparação foi realizada entre os resultados de resistência à compressão axial obtidos após a imersão em solução salina, nota-se que os resultados para o traço T 20 ARCO foram superiores e estatisticamente diferentes de T REF e T 30 ARCO.

É possível observar na Figura 29, que todos os concretos apresentaram o mesmo comportamento após o ataque em solução salina. Ou seja, houve uma queda de resistência à compressão axial após o ataque.

**Figura 29** – Resultados da resistência à compressão axial – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

#### b) Módulo de Elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade referente aos traços utilizados na análise 1 são apresentados na Figura 30.

Observa-se, na Figura 30, que para as idades de 28 e 90 dias os resultados dos traços T REF, T 20 ARCO e T 30 ARCO foram similares quando comparados entre si.

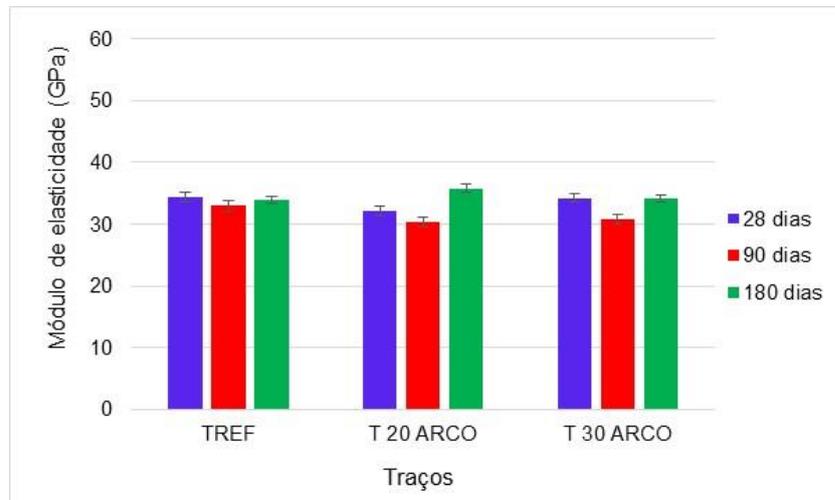
Isto é confirmado pela análise estatística realizada já que não houve diferença significativa nos resultados de T REF, T 20 ARCO e T 30 ARCO para as idades de 28 e 90 dias; nesse caso, o aumento no teor de substituição não impactou nos resultados de módulo de elasticidade.

Para a idade de 180 dias, houve diferença significativa nos resultados de T 20 ARCO quando comparados ao T REF e ao T 30 ARCO. Nesse caso, os resultados obtidos para o T 20 ARCO foram superiores aos demais traços, afirmando novamente que para os ensaios mecânicos, tanto para resistência à compressão axial quanto para o módulo de elasticidade a utilização do agregado reciclado de concreto (ARCO) não afeta as características do concreto de forma negativa.

É possível observar na Figura 30 que o comportamento dos concretos foi similar quando comparados entre si. Para a idade de 90 dias, todos os concretos

apresentaram uma queda no módulo de elasticidade, que para a idade de 180 dias voltou a subir.

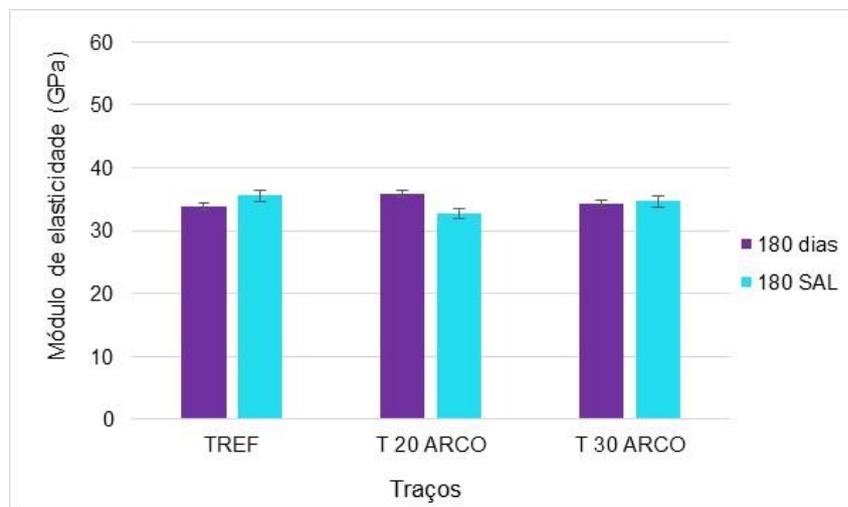
**Figura 30** – Resultados do módulo de elasticidade – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

A Figura 31 apresenta os resultados de módulo de elasticidade do concreto expostos às intempéries durante 180 dias comparando-os aos que foram imersos em solução salina.

**Figura 31** – Resultados do módulo de elasticidade – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

Após a imersão em solução salina, T REF e T 30 ARCO apresentaram um aumento de módulo de elasticidade. Esse comportamento não foi observado para o

T 20 ARCO, que apesar de, aos 180 dias ter apresentado resultados melhores do que os demais traços, aos 180 dias após imersão em solução salina apresentou resultados inferiores e estatisticamente diferentes de T REF e T 30 ARCO.

#### 6.2.2 Análise 2 – T REF *versus* T 20 ARCI *versus* T 30 ARCI;

Para a análise 2 foram comparados os teores de substituição de 0, 20% e de 30% para o agregado reciclado cimentício, ou seja, para os traços T REF, T 20 ARCI e T 30 ARCI.

##### a) Resistência à compressão axial

A Figura 32 apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 7, 28, 90 e 180 dias dos traços utilizados para a análise 2.

Para a análise do agregado reciclado cimentício, era esperado observar que os resultados referentes a T 20 ARCI fossem superiores ao T 30 ARCI, já que, quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado maiores as alterações nas características do concreto.

O traço de teor de 20% de substituição (T 20 ARCI) apresentou resultados de resistência à compressão axial bem inferiores aos resultados dos traços T REF e T 30 ARCI. Estatisticamente, para as idades de 7, 28 e 90 dias o T 20 ARCI é significativamente inferior aos traços T 30 ARCI e T REF.

Para a idade de 180 dias, houve uma queda na resistência à compressão axial do T 20 ARCI e T 30 ARCI. Essa queda não era um comportamento esperado já que, quanto maior a idade maior deveria ser a resistência à compressão axial do concreto. Para esse caso, o T REF apresentou resultados superiores e estatisticamente diferentes dos traços que utilizaram agregado reciclado (T 20 ARCI e T 30 ARCI).

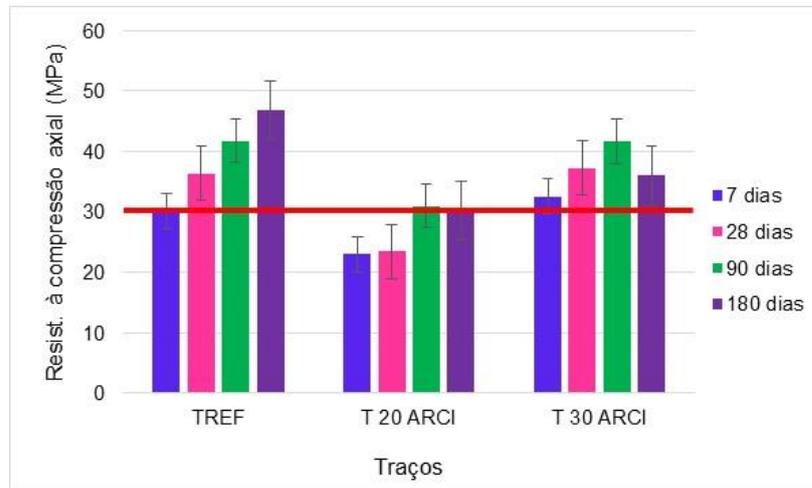
Ainda assim, mesmo na idade de 180 dias, o resultado do traço T 30 ARCI foi superior e estatisticamente diferente do resultado de T 20 ARCI.

Nesse caso, T 30 ARCI apresentou resultados superiores do que T 20 ARCI, ou seja, o maior teor de substituição (30%) atingiu resultados superiores e melhores do que o teor de substituição de 20%.

O traço T 30 ARCI não apresentou diferenças significativas quando comparado ao T REF, podendo significar que para esse tipo de agregado o teor de 30% possa resultar em valores similares aos do concreto referência. Outro fator que também pode

ter influenciado nesta queda de resistência e explique esse comportamento de T 20 ARCI são as condições climáticas no dia da rodagem do concreto, o clima estava quente e com baixa umidade no ar, e poderia ter ocorrido uma evaporação da água de amassamento, modificando e prejudicando os resultados do T 20 ARCI.

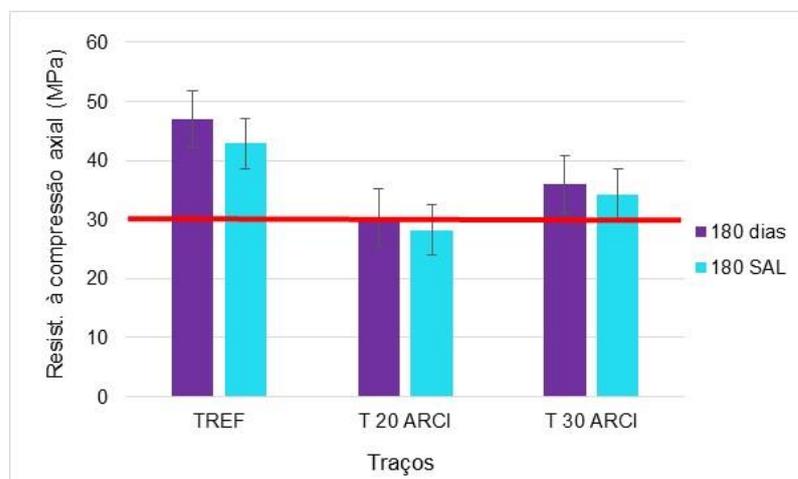
**Figura 32** – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 2.



Fonte: da autora, 2018.

Para os 180 dias imersos em solução salina, os resultados são apresentados na Figura 33. Os concretos T REF e T 30 ARCI apresentaram resultados de resistência à compressão axial, estatisticamente iguais, enquanto que T 20 ARCI apresentou resultados inferiores e estatisticamente diferentes de T REF e T 30 ARCI, mantendo a tendência observada para as demais idades de ensaio.

**Figura 33** – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 2

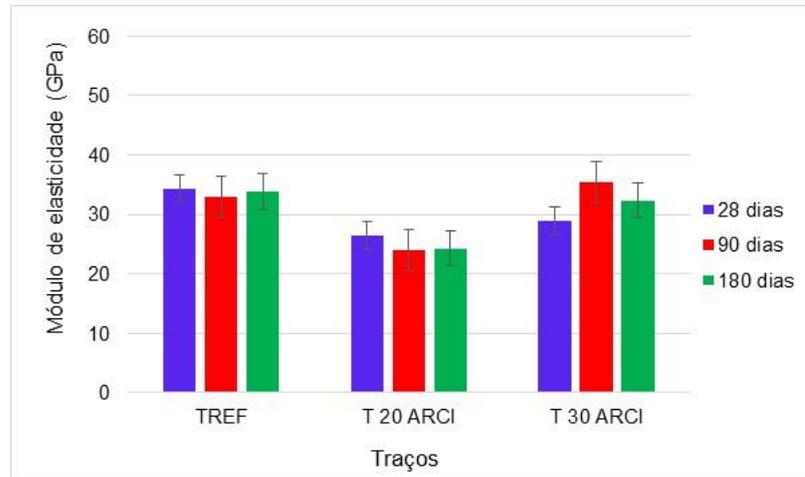


Fonte: da autora, 2018.

## b) Módulo de Elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade para os traços T REF, T 20 ARCI e T 30 ARCI são representados na Figura 34.

**Figura 34** - Resultados do módulo de elasticidade - Análise 2



Fonte: da autora, 2018.

Para os traços com utilização do agregado reciclado cimentício (T 20 ARCI e T 30 ARCI) nota-se uma queda nos valores de módulo de elasticidade aos 28 dias quando comparados a T REF.

Aos 90 dias, o comportamento observado não é o mesmo do que aos 28 dias, e o traço T 30 ARCI apresenta um aumento do módulo de elasticidade e estatisticamente não há diferenças significativas entre T REF e T 30 ARCI. Porém os resultados de T 20 ARCI continuam inferiores, tornando-o estatisticamente diferente dos demais traços.

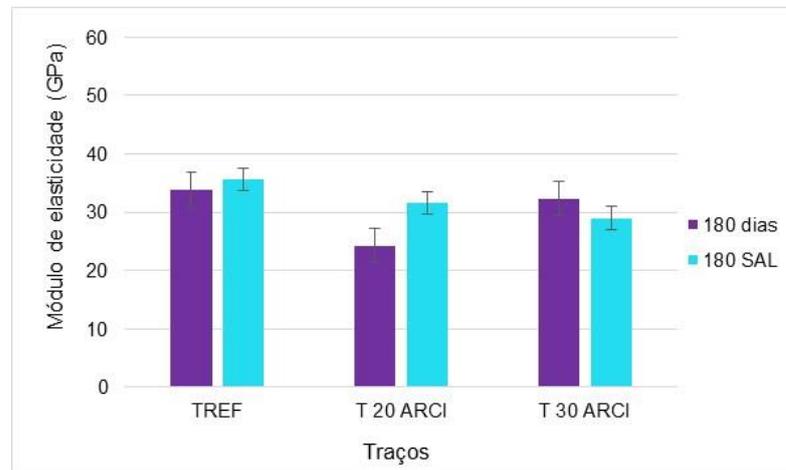
Aos 180 dias, o comportamento dos resultados do módulo de elasticidade se manteve.

Assim como, para a resistência à compressão axial, o concreto T REF e o concreto T 30 ARCI apresentaram comportamento similar entre si para a variável módulo de elasticidade. O concreto T 20 ARCI apresentou resultados inferiores dos demais.

Nas idades mais avançadas (90 dias e 180 dias) o comportamento da variável módulo de elasticidade foi similar à análise da resistência à compressão axial, onde os resultados do traço com o teor de 30%, quando comparado ao traço referência, não apresentaram resultados com diferenças significativas.

Os resultados de módulo de elasticidade após 180 dias imersos em solução salina são apresentados na Figura 35. Houve uma queda do módulo de elasticidade para o T 30 ARCI, comportamento esse que não foi observado para os traços T REF e T 20 ARCI. Nesse caso, o resultado de módulo de elasticidade do traço T REF é superior e estatisticamente diferente dos referentes aos traços T 20 ARCI e T 30 ARCI.

**Figura 35** – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 2



Fonte: da autora, 2018.

### 6.2.3 Análise 3 – T REF *versus* T 20 ARCI Tratado *versus* T 30 ARCI Tratado;

Na análise 3, foram comparados os teores de substituição de 0, 20% e de 30% para os traços T REF, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado, respectivamente.

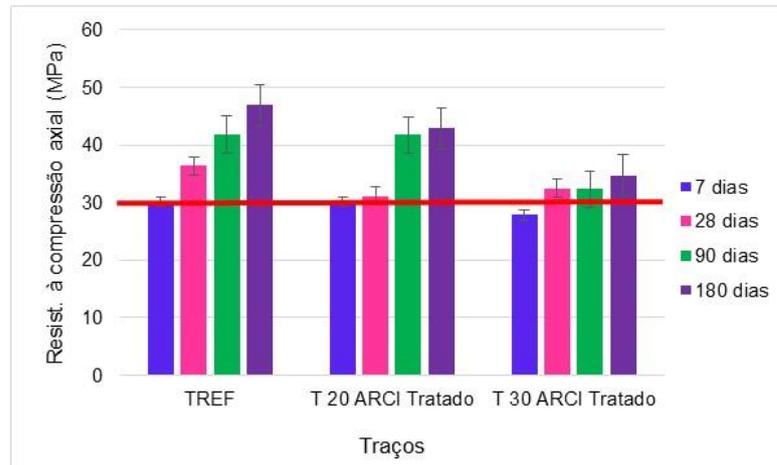
#### a) Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial da análise 3 são apresentados pela Figura 36.

No caso do agregado cimentício tratado, os resultados de resistência à compressão axial obtidos para os três concretos, nas idades de 7 e 28 dias não apresentaram diferenças estatisticamente significativas quando comparados entre si.

Porém, para as idades mais avançadas, esse comportamento não foi mantido. A resistência à compressão axial aos 90 dias e aos 180 dias foram similares entre o T REF e o T 20 ARCI Tratado. Porém, para o teor de 30% de substituição, os resultados obtidos foram inferiores e estatisticamente diferentes do traço referência (T REF) e do traço com 20% de agregado reciclado (T 20 ARCI Tratado).

**Figura 36 – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 3.**



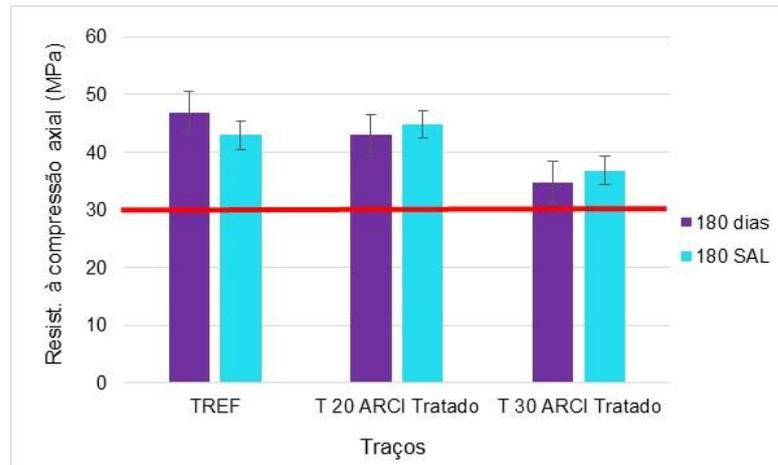
Fonte: da autora, 2018.

Para o agregado reciclado cimentício tratado considerando a variável resistência à compressão axial, a utilização de 20% de agregado reciclado como substituto do agregado natural obteve resultados satisfatórios. Porém, o aumento do teor de substituição de 20 para 30% de agregado reciclado nesse caso, não seria ideal.

Silva e Andrade (2017) apresentaram uma queda de 4% na resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias do concreto referência para o concreto com substituição de 25% de agregado natural por agregado reciclado. Diversos autores apontam que essa queda de resistência para os concretos produzidos com agregados reciclados ocorre devido à porosidade do agregado reciclado, porém, Dabhade *et al. apud* Silva e Andrade (2017), sugeriram que esse comportamento ocorre devido à argamassa que ainda recobre o agregado reciclado, o que possibilita a ligação entre o novo concreto com o agregado reciclado.

A Figura 37 apresenta os resultados para a resistência à compressão axial do concreto após 180 dias submerso em solução salina.

**Figura 37** – Resultados da resistência à compressão axial - Análise 3.



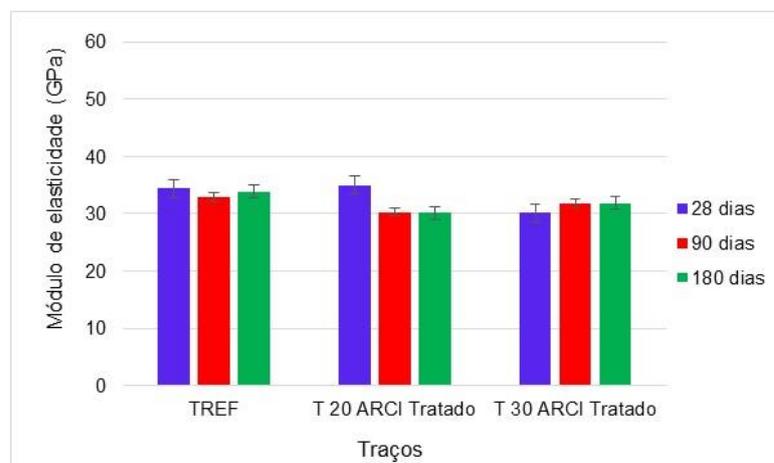
Fonte: da autora, 2018.

Para a resistência à compressão axial após 180 dias de imersão em solução salina o resultado foi semelhante para as idades de 7 e 28 dias, não havendo diferença significativa em nenhum dos casos. Nota-se uma diminuição na resistência à compressão axial para o T 30 ARCI Tratado, porém, essa diminuição não foi estatisticamente significativa.

#### b) Módulo de Elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade para a análise 3 estão apresentados na Figura 38.

**Figura 38** – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 3.

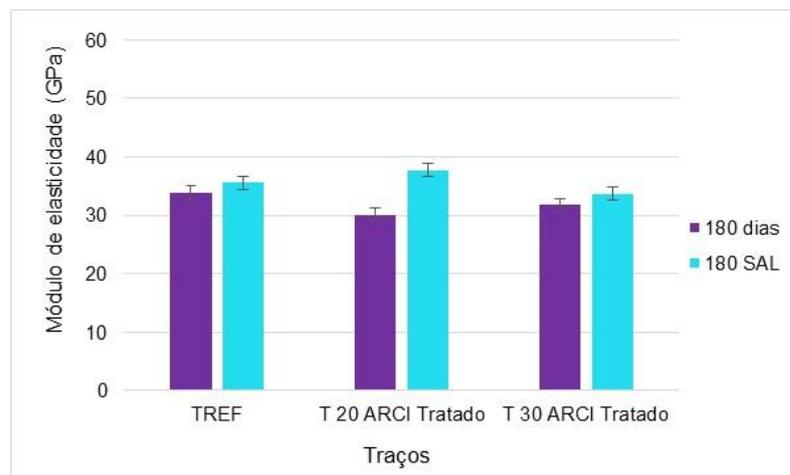


Fonte: da autora, 2018.

Nota-se, na Figura 38 que os concretos utilizando agregado reciclado cimentício tratado, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado, apresentaram resultados similares ao T REF. A análise estatística comprova que não houve diferenças significativas entre os traços para a variável módulo de elasticidade.

Após a imersão em solução salina, os resultados apresentados na Figura 39 mostram que todos os traços tiveram o mesmo comportamento, ou seja, apresentaram resultados de módulo de elasticidade maiores após a imersão em solução salina. Não há diferenças estatisticamente significativas entre os três traços.

**Figura 39** – Resultados do módulo de elasticidade - Análise 3.



Fonte: da autora, 2018.

#### 6.2.4 Análise 4 – T REF *versus* T 20 ARCO *versus* T 20 ARCI *versus* T 20 ARCI Tratado;

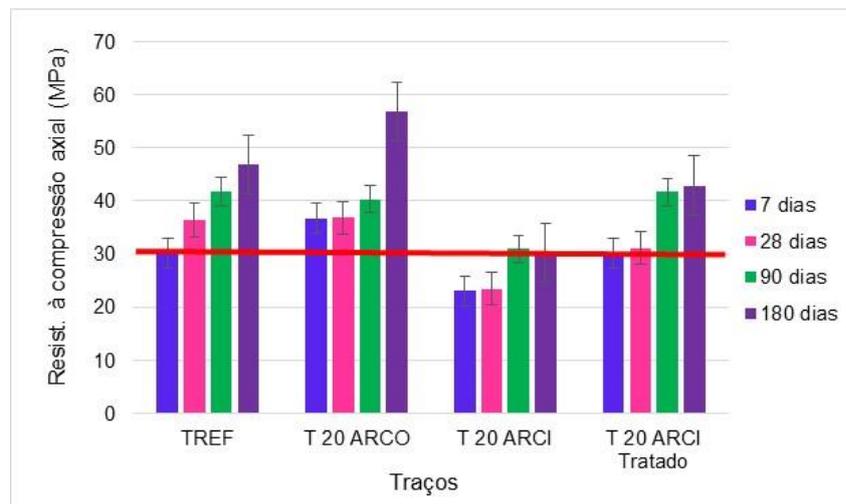
Para a análise 4 foram comparados os tipos de agregados utilizados neste trabalho, ou seja, o teor de substituição foi mantido em 20% e foram observadas as diferenças entre os traços T REF, T 20 ARCO, T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado.

##### a) Resistência à compressão axial

A análise estatística efetuada para a variável resistência à compressão axial quando comparados os tipos de agregados fixando o teor de substituição de 20% apontou que, os concretos utilizando diferentes tipos de agregado reciclado apresentaram resultados estatisticamente diferentes entre si.

A Figura 40 apresenta os resultados de resistência à compressão axial utilizados para a análise 4.

**Figura 40** - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 4.



Fonte: da autora, 2018.

Para a resistência aos 7 dias e aos 90 dias não existem diferenças significativas nos resultados utilizando AN (T REF), ARCO (T 20 ARCO) e ARCI Tratado (T 20 ARCI Tratado). Porém, o concreto utilizando ARCI apresentou valor estatisticamente inferior quando comparados aos outros traços.

Aos 28 dias, T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado apresentaram resultados estatisticamente iguais ao T REF, porém, quando comparados entre si, T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado apresentaram resultados de resistência à compressão axial estatisticamente diferentes, sendo que T 20 ARCI Tratado apresentou resultados de resistência à compressão axial inferiores ao T 20 ARCO.

O T 20 ARCI na idade de 28 dias apresentou resultados inferiores a T REF e T 20 ARCO, porém apresentou resultados estatisticamente iguais a T 20 ARCI Tratado. Nesse caso, aos 28 dias, T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado não atingiram a classe de resistência estipulada C30.

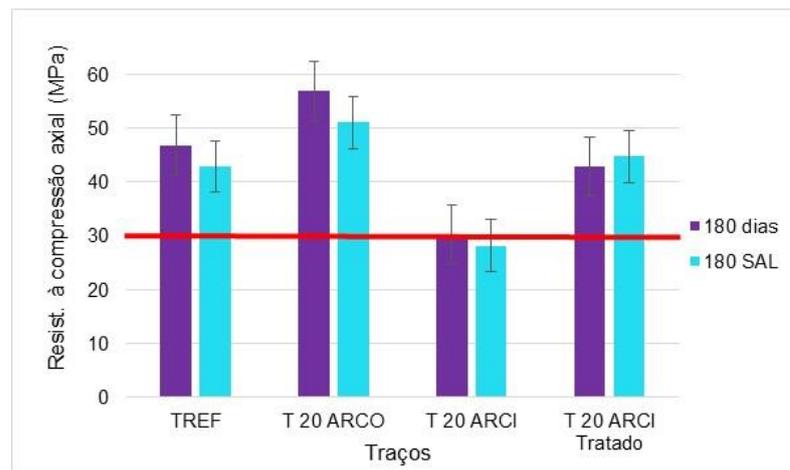
Aos 180 dias, o concreto utilizando T 20 ARCI Tratado apresentou resultados estatisticamente semelhantes a T REF. O traço T 20 ARCI apresentou resultados inferiores e estatisticamente diferentes de T REF, T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado. E o traço T 20 ARCO apresentou os melhores resultados para a variável resistência à compressão axial atingindo a média de, aproximadamente, 55 MPa, tornando-se estatisticamente diferente em relação aos demais traços desta análise.

Quanto à comparação entre T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado, com o objetivo de determinar se houveram diferenças e melhoras nos resultados após o tratamento

realizado no agregado, nota-se que os resultados apresentados por T 20 ARCI Tratado, para a variável resistência à compressão axial, foram superiores e estatisticamente diferentes dos resultados apresentados por T 20 ARCI para todas as idades menos 28 dias, na qual são estatisticamente iguais.

A Figura 41 apresenta os resultados de resistência à compressão axial após os 180 dias dos corpos de prova imersos em solução salina.

**Figura 41** - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 4.



Fonte: da autora, 2018.

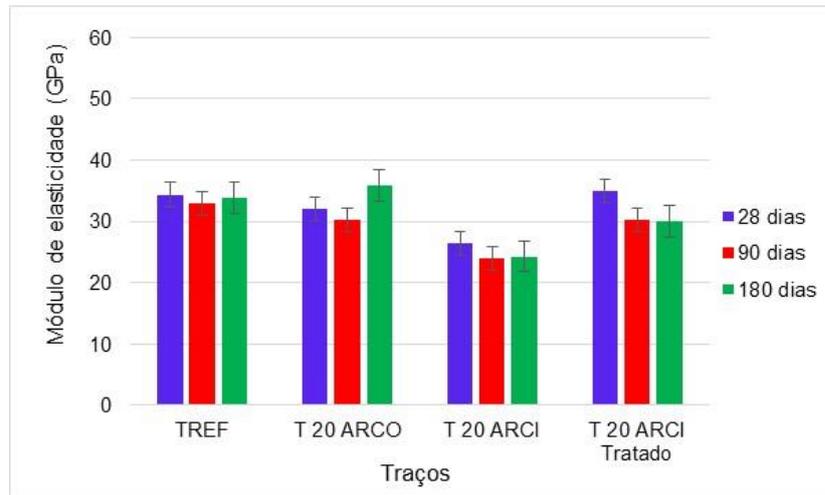
Após a imersão em solução salina, os resultados de resistência à compressão axial foram analisados estatisticamente e apresentaram o traço T 20 ARCO com valores superiores aos traços TREF e T 20 ARCI Tratado, que apresentaram resultados superiores ao traço T 20 ARCI.

No caso da variável resistência à compressão axial, os concretos que apresentaram melhor desempenho mecânico, ou resultados similares ao T REF foram, T 20 ARCO com resultados similares ou superiores ao T REF e, T 20 ARCI Tratado com resultados similares ao T REF. Para todas as idades, T 20 ARCI apresentou resultados estatisticamente inferiores aos demais.

#### b) Módulo de Elasticidade

A Figura 42 apresenta os resultados de módulo de elasticidade para as idades de 28, 90 e 180 dias dos concretos T REF, T 20 ARCO, T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado.

**Figura 42** - Resultados do módulo de elasticidade - Análise 4.



Fonte: da autora, 2018.

Estatisticamente, para as idades de 28 e 90 dias, os traços T REF, T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado apresentaram resultados de módulo de elasticidade similares entre si, diferenciando-se apenas o T 20 ARCI, que apresentou resultados inferiores.

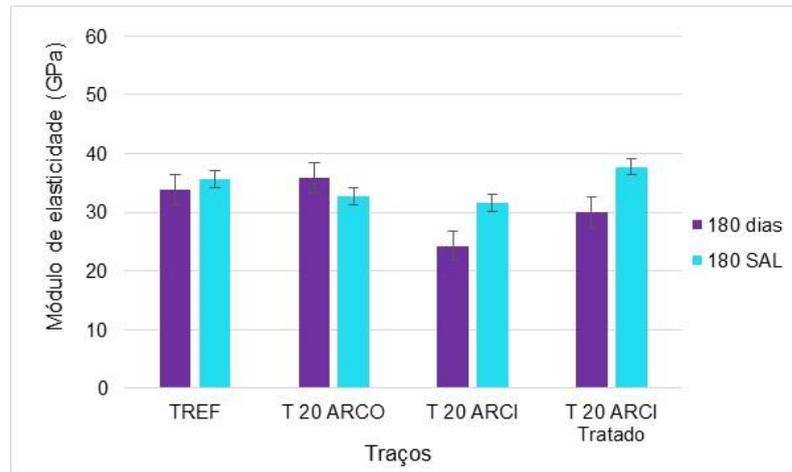
Para a idade de 180 dias, T 20 ARCO continuou apresentando comportamento mecânico na variável módulo de elasticidade similar ao T REF, enquanto que os traços T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado são estatisticamente inferiores.

A análise das variáveis, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade, indicou que o agregado ARCO em substituição ao agregado natural no teor de 20%, não proporciona redução nos resultados, e que o tratamento do agregado ARCI pode ter melhorado o desempenho do concreto.

Na Figura 43, apresenta-se os resultados da variável módulo de elasticidade.

Nesse caso, após imersão em solução salina, o T REF apresentou resultados estatisticamente diferentes dos demais traços. O concreto T 20 ARCI Tratado apresentou resultados superiores ao T REF, enquanto que o T 20 ARCO e T 20 ARCI tiveram resultados estatisticamente inferiores ao T REF.

**Figura 43** - Resultados de módulo de elasticidade - Análise 4.



Fonte: da autora, 2018.

#### 6.2.5 Análise 5 – T REF *versus* T 30 ARCO *versus* T 30 ARCI *versus* T 30 ARCI Tratado;

Para a análise 5 foram comparados os tipos de agregados utilizados nesse trabalho mantendo-se o teor de substituição do agregado natural fixo em 30%. Foram observadas as diferenças entre os resultados dos traços T REF, T 30 ARCO, T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado.

##### a) Resistência à compressão axial

Para a análise 5, os resultados obtidos de resistência à compressão axial serão apresentados na Figura 44.

Para o teor de 30% de substituição, a resistência à compressão axial aos 7 dias dos concretos T 30 ARCO e T 30 ARCI Tratado são estatisticamente diferentes e menores do que a resistência à compressão axial dos concretos T REF e T 30 ARCI. Por outro lado, T 30 ARCI apresentou resultados estatisticamente igual a T REF.

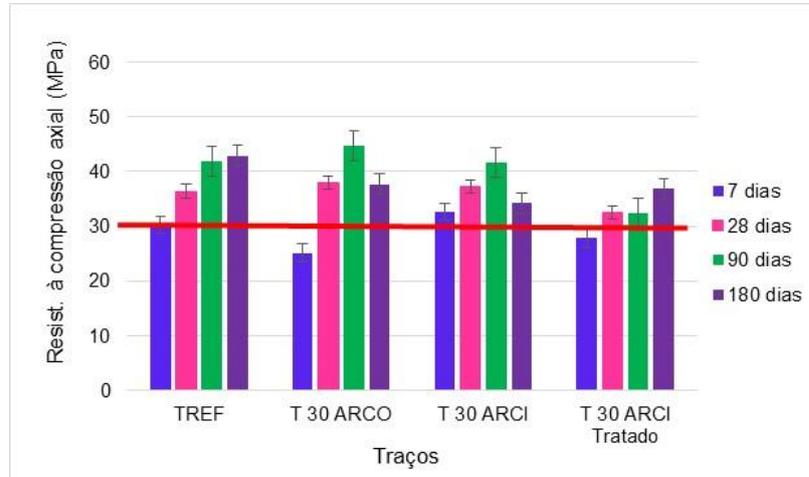
Para a idade de 28 dias, não há diferença significativa nos resultados de resistência à compressão axial para os quatro traços.

Para a idade de 90 dias, T 30 ARCO e T 30 ARCI apresentaram resultados similares ao T REF, enquanto que T 30 ARCI Tratado apresentou resultados inferiores.

Para a resistência à compressão axial aos 180 dias, não há diferenças significativas entre os resultados dos traços T REF e o T 30 ARCO e ambos são superiores aos traços T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado, que não apresentaram

diferença estatística entre si, apontando que o tratamento não melhorou as características do concreto nesta dosagem de substituição.

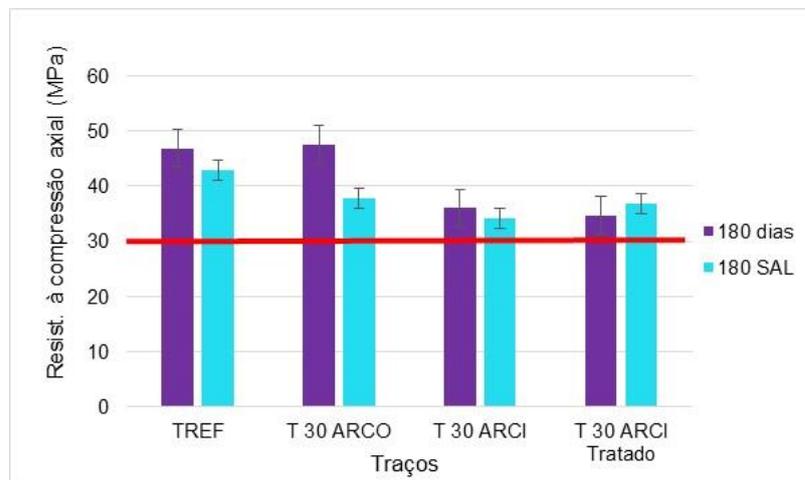
**Figura 44** - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 5.



Fonte: da autora, 2018.

A resistência à compressão axial após a imersão em solução salina é apresentada na Figura 45.

**Figura 45** - Resultados de resistência à compressão axial - Análise 5.



Fonte: da autora, 2018.

Nesse caso, após a imersão em solução salina, todos os concretos apresentaram resultados similares entre si. Vale ressaltar, que após o ataque salino realizado nos concretos, tanto para o teor de substituição de 20% quanto para o teor de 30%, os concretos produzidos com agregado reciclado cimentício tratado

(T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado) apresentaram comportamento diferente quando comparados aos demais. Nesse caso, o valor da resistência à compressão axial apresentou um aumento após a imersão em solução salina.

#### b) Módulo de Elasticidade

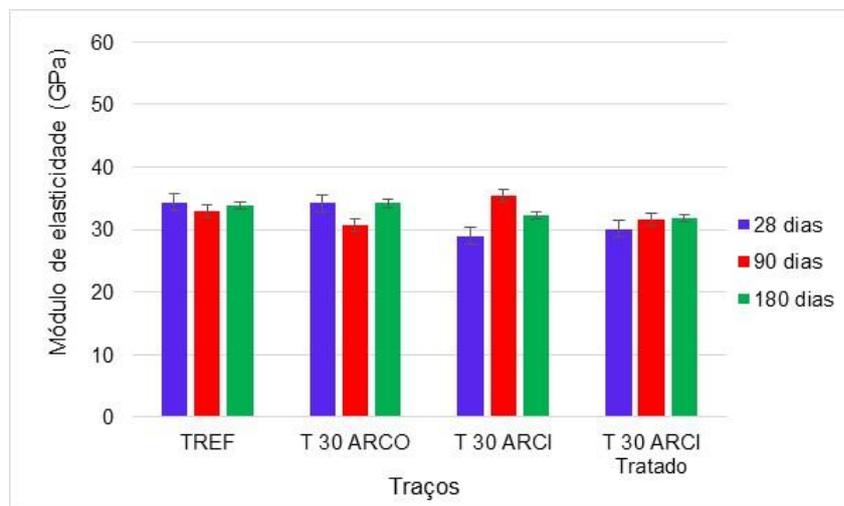
A Figura 46 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dos traços que estão sendo analisados para o teor de substituição de 30%.

Para o teor de substituição de 30%, para a idade de 28 dias, T 30 ARCO, T 30 ARCI Tratado e T REF apresentaram resultados estatisticamente similares entre si. Por sua vez o T 30 ARCI apresentou resultado estatisticamente diferente e inferior aos demais.

Porém, para a idade de 90 dias, T 30 ARCO, T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado apresentaram resultados estatisticamente iguais a T REF. Nesse caso, T 30 ARCI apresentou valores de módulo de elasticidade maiores e, conseqüentemente, diferenciou-se estatisticamente de T 30 ARCO.

Para a idade de 180 dias todos os quatro traços apresentaram resultados estatisticamente similares entre si.

**Figura 46** - Resultados de módulo de elasticidade - Análise 5.



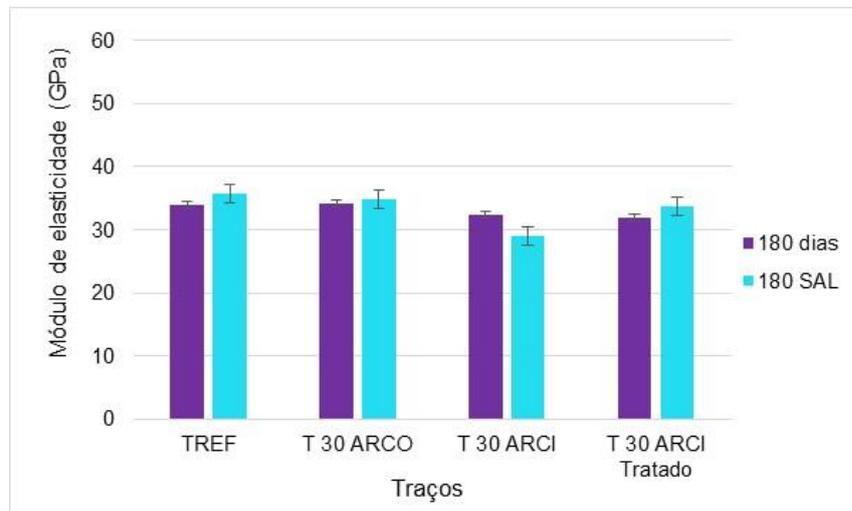
Fonte: da autora, 2018.

McGuinnis *et al.* (2017) apontaram que para seus ensaios houve uma perda de 26,4% nos resultados de módulo de elasticidade para os concretos produzidos com 50% de agregado reciclado, e para os concretos com teor de substituição de 100% a queda foi de 34,4%. O comportamento observado por McGuinnis *et al.* (2017) não foi

o mesmo observado neste trabalho, no qual se utilizou teores de substituição menores (20 e 30%).

Na Figura 47, estão apresentados os resultados de módulo de elasticidade após exposição dos corpos de prova em solução salina.

**Figura 47** - Resultados módulo de elasticidade - Análise 5.



Fonte: da autora, 2018.

Após imersão em solução salina, o T 30 ARCI apresentou resultados inferiores ao T REF, T 30 ARCO e T 30 ARCI Tratado, sendo estatisticamente diferente dos demais.

#### 6.2.6. Discussão dos resultados

A primeira análise realizada tinha como objetivo a análise do agregado reciclado de concreto (ARCO). Nesse caso, tanto para a resistência à compressão axial quanto para o módulo de elasticidade ambos os teores de substituição apresentaram resultados similares ao T REF. Ou seja, os resultados apresentados pelos concretos T 20 ARCO e T 30 ARCO foram estatisticamente iguais aos obtidos para o traço T REF, na maioria das idades, e em alguns casos o teor de substituição de 20% apresentou resultados superiores ao T REF.

Silva e Andrade (2017) obtiveram perda na resistência à compressão axial para concretos que utilizavam apenas agregado reciclado quando comparados ao concreto referência; este comportamento foi melhorado pela adição de cinza volante.

Por outro lado, Afroughsabet *et al.* (2017), através da britagem de concretos de classe de resistência 80 MPa, produziram agregados reciclados que quando utilizados

na produção do concreto com teor de substituição de 50% apresentaram resultados superiores ao concreto referência. Quando esse teor de substituição atingiu 100% os resultados de resistência à compressão axial obtidos foram similares ao do concreto referência. Os autores ainda apontam que, quando os agregados reciclados produzidos partem de um concreto de 40 MPa, o mesmo comportamento não foi observado, e os resultados de resistência à compressão axial foram inferiores ao concreto referência.

Para este trabalho, o agregado reciclado de concreto (ARCO) foi produzido pela britagem de concretos cuja a resistência variava entre C30 e C50. Como foi observado, para o teor de substituição de 20%, a resistência à compressão axial do concreto T 20 ARCO atingiu valores superiores quando comparado ao concreto convencional. Quando o teor de substituição utilizado é o de 30% a resistência à compressão axial do T 30 ARCO foi similar ao concreto referência.

Ou seja, a qualidade do agregado reciclado pode estar diretamente ligada ao tipo de material britado.

Para o caso do agregado reciclado cimentício (ARCI), foi observado resultado inferior para o traço com teor de substituição de 20% (T 20 ARCI). Nesse caso, o teor de substituição que apresentou resultados similares ao T REF foi o de 30% (T 30 ARCI).

Era esperado que quanto maior fosse o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, maior seria o impacto e a diminuição das características do concreto, porém isso não foi o observado. O fato de T 20 ARCI ter apresentado resultados inferiores a T REF e T 30 ARCI pode ser explicado pelas condições ambientais no dia da confecção do concreto, que estava seco e quente, onde a água de amassamento pode ter evaporado em parte, afetando diretamente as características desse traço.

Para o agregado reciclado cimentício, em algumas idades o aumento do teor de substituição de 20 para 30% não afetou significativamente os resultados. Na maioria das idades, T REF, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado apresentaram resultados estatisticamente iguais. Nos casos onde havia diferença estatisticamente significativa, o traço com teor de substituição de 20% (T 20 ARCI Tratado) apresentou resultados superiores ao traço com 30% de substituição (T 30 ARCI Tratado).

Pelissari e Miranda (2016) realizaram confeccionaram concretos de classe de resistência de 30MPa, com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo

agregado reciclado. Observaram que aos 28 dias todos os traços atingiram 30 MPa. Nesse caso, o único concreto que apresentou resultados significativamente inferiores ao T REF foi o T 20 ARCI e que não atingiu a classe de resistência proposta (C30) aos 28 dias.

Para a comparação entre os tipos de agregados utilizados neste trabalho, para as variáveis referentes a características mecânicas, observa-se que para o teor de substituição de 20% o traço utilizando agregado reciclado de concreto apresentou resultados superiores aos demais, em algumas idades, superiores aos resultados obtidos por T REF. Porém, o T ARCI Tratado também apresentou resultados similares ao T REF, garantindo as características do concreto convencional. Assim como apontando anteriormente, a performance do T 20 ARCI foi inferior aos dos demais traços.

Quando se trata do teor de substituição de 30%, para a variável resistência à compressão axial, T 30 ARCI e T 30 ARCO apresentaram bons resultados que garantiram a qualidade e apresentaram resultados similares ao T REF. Já para a variável módulo de elasticidade, T 30 ARCO e T 30 ARCI Tratado apresentaram os melhores resultados.

Afroughsabet *et al.* (2017) apontaram que a resistência à compressão axial do concreto produzido com agregado reciclado depende da qualidade e da resistência do concreto que originou o agregado reciclado. Ou seja, quanto melhor for a qualidade do agregado reciclado, melhores serão as características do concreto. Nesse caso, os traços que utilizaram o agregado reciclado de concreto (produzido em laboratório), e o traço utilizando o agregado cimentício tratado apresentaram resultados estatisticamente similares ao traço referência (100% de agregado natural).

Comparando-se as características físicas e mecânicas em função do teor de substituição 20 e 30%, é possível afirmar que, para as características mecânicas do concreto, o impacto causado pelo aumento no teor de substituição não diminui de forma impactante suas características.

Nota-se em função das análises de todas as características que, o agregado reciclado de concreto é o agregado que apresenta a melhor qualidade e conseqüentemente, mantém as características mecânicas do concreto convencional. A dificuldade é manter a qualidade deste agregado para que na separação, triagem e britagem que ocorre nas usinas recicladoras ele continue apresentando sua característica original, ser 100% de resíduo de concreto estrutural.

### 6.3 Ensaios de medição indireta da durabilidade

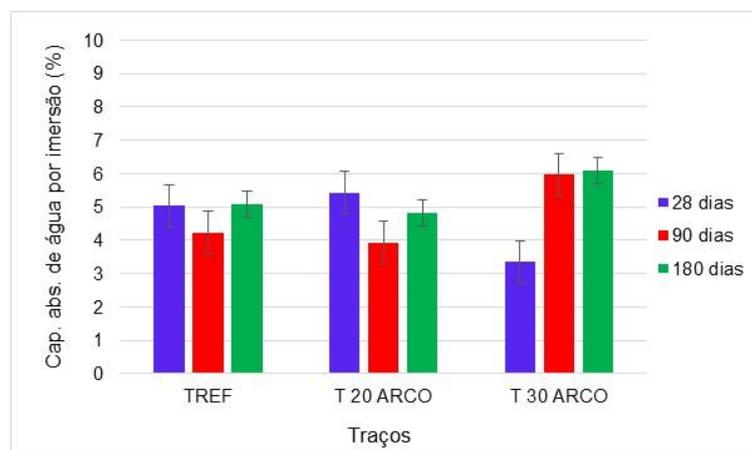
#### 6.3.1 Análise 1 – T REF versus T 20 ARCO versus T 30 ARCO;

##### a) Capacidade de absorção de água por imersão

Os resultados para a variável capacidade de absorção de água por imersão são apresentados na Figura 48.

Observa-se que, aos 28 dias, os resultados de capacidade de absorção de água por imersão obtidos pelo concreto T REF foram similares aos do concreto T 20 ARCO, atingindo 5,0 e 5,2%, respectivamente, enquanto que o traço T 30 ARCO apresentou uma capacidade de absorção de água menor atingindo a média de 3,2%.

**Figura 48** – Resultados de capacidade de absorção de água por imersão – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

Porém, aos 90 e aos 180 dias, a capacidade de absorção de água de T 30 ARCO subiu de 3,2% para 6,0%, tornando-se estatisticamente diferente dos traços T REF e T 20 ARCO, que permaneceram com resultados estatisticamente iguais para a idade de 180 dias.

Nesse caso, através da análise estatística realizada, foi possível observar que, quando se trata da variável capacidade de absorção de água por imersão o traço utilizando agregado reciclado com teor de 20% (T 20 ARCO) apresentou comportamento similar ao T REF. Porém, ao aumentar o teor de substituição para 30% houve um aumento na capacidade de absorção de água por imersão, e consequentemente, comprovando que para esse tipo de agregado e para essa

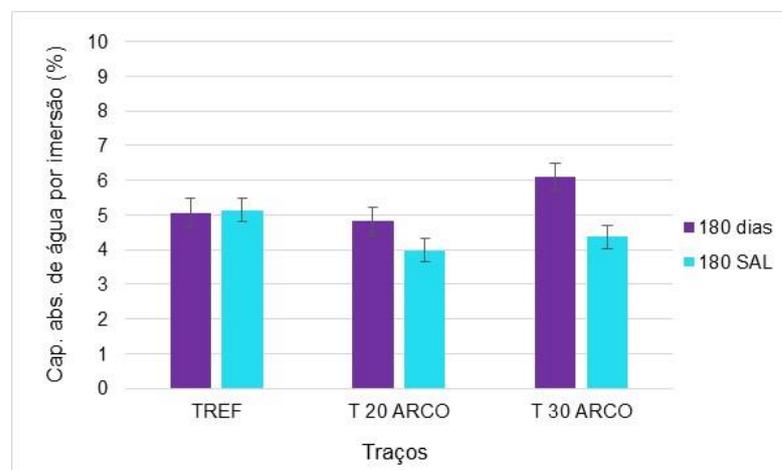
variável, o aumento do teor de substituição significou aumento na capacidade de absorção de água.

Esse comportamento pode ser explicado pela porosidade do agregado reciclado, que pode modificar as características do concreto, ou seja, pode aumentar a sua porosidade e conseqüentemente a sua capacidade de absorção de água. Para o teor de substituição de 20% não foi observado mudanças e nem impactos nesta característica do concreto, porém, para o teor de substituição de 30% esta característica foi modificada.

Vale ressaltar que a diferença de capacidade de absorção de água por imersão entre o T REF e o T 30 ARCO foi de apenas 1%.

A Figura 49 apresenta a capacidade de absorção de água por imersão após o ataque em solução salina.

**Figura 49** - Resultados da capacidade de absorção de água por imersão – Análise 1.



Fonte: da autora, 2018.

Observa-se, na Figura 49, que a capacidade de absorção de água por imersão do T REF manteve-se igual para os dois tipos de ataque (exposição às intempéries e imersão em solução salina). Porém, para os traços utilizando agregados reciclados (T 20 ARCO e T 30 ARCO) a capacidade de absorção de água diminuiu, tornando os resultados menores do que para o T REF.

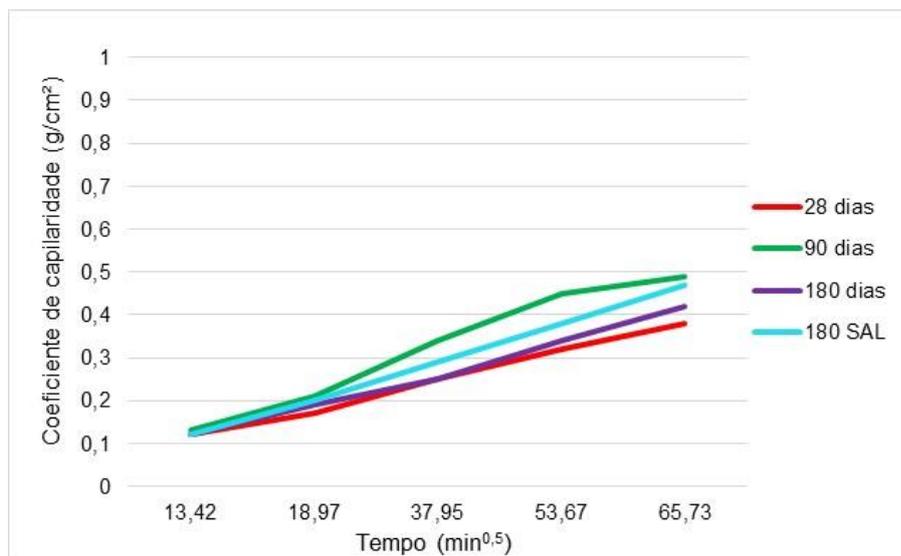
#### b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

As Figuras 50, 51 e 52 apresentam os resultados dos ensaios de capacidade de absorção de água por capilaridade para os traços T REF, T 20 ARCO e T 30 ARCO, respectivamente. Cada Figura apresenta os resultados obtidos para cada traço nas idades de 28, 90, 180 dias e 180 dias após imersão em solução salina.

Observa-se nas figuras que para todos os traços (T REF, T 20 ARCO e T 30 ARCO) os coeficientes de capilaridade foram menores na idade de 28 dias.

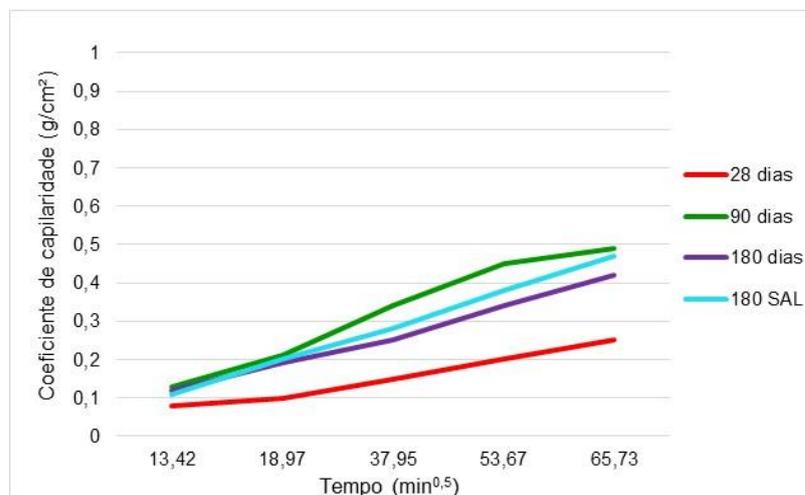
Pode-se observar também, que os resultados obtidos de 180 dias e 180 dias após imersão salina foram similares entre si para todos os traços. Com isso, é possível afirmar que, nas condições deste ensaio, não houve diferença na capacidade de absorção de água do concreto submetido à imersão em solução salina quando comparado ao exposto às intempéries pelo mesmo período de tempo.

**Figura 50** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF.



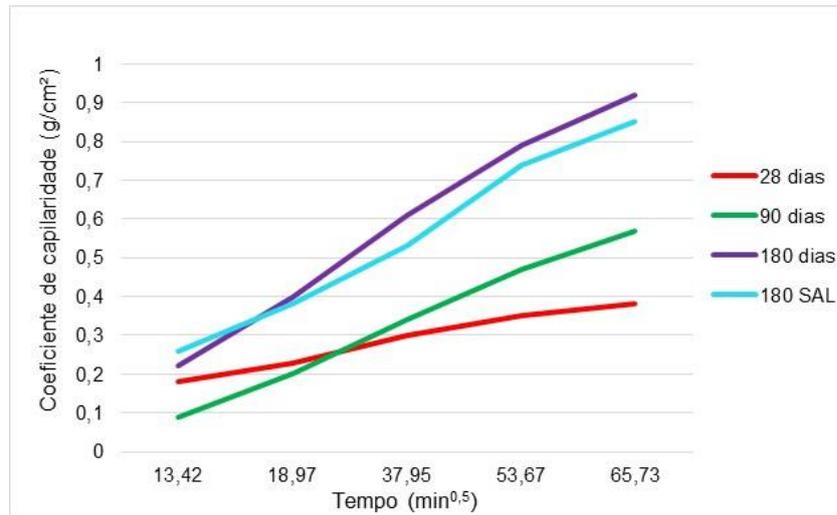
Fonte: da autora, 2018.

**Figura 51** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCO.



Fonte: da autora, 2018.

**Figura 52** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCO.



Fonte: da autora, 2018.

Comparando-se as Figuras 51 e 52 nota-se que os resultados obtidos pelos corpos de prova do T REF e pelo T 20 ARCO foram similares entre si. Aos 28 dias o coeficiente de capilaridade apresentou o menor resultado, seguido da idade de 180 dias, 180 dias após imersão em solução salina e, finalizando com o maior coeficiente de capilaridade obtido, para a idade de 90 dias. É possível observar também que os resultados apresentaram crescimento contínuo para todas as idades e que o coeficiente de capilaridade não ultrapassou os 0,5 g/cm<sup>2</sup> para ambos os casos.

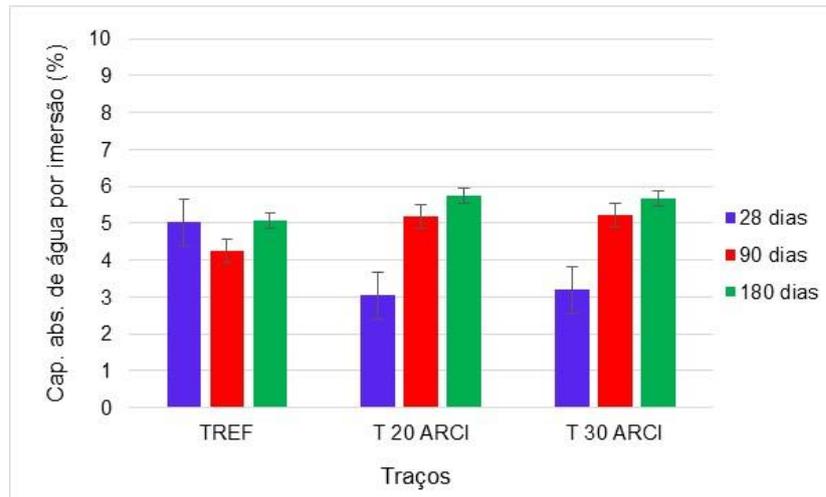
Já para o T 30 ARCO, o resultado de coeficiente de capilaridade foi diferente dos demais. As curvas foram mais acentuadas, além do que apresentaram maior coeficiente de capilaridade, resultando para a idade de 180 dias um valor de, aproximadamente, 0,9 g/cm<sup>2</sup>.

### 6.3.2 Análise 2 – T REF *versus* T 20 ARCI *versus* T 30 ARCI;

#### a) Capacidade de absorção de água por imersão

Para a variável capacidade de absorção de água por imersão, para a análise 2, os resultados são apresentados na Figura 53.

**Figura 53** – Resultados da capacidade de absorção de água por imersão - Análise 2.



Fonte: da autora, 2018.

Aos 28 dias, os resultados de capacidade de absorção de água dos traços utilizando agregado reciclado foram menores do que os resultados do T REF. Porém, esse comportamento não foi mantido para as idades mais avançadas, de 90 e 180 dias.

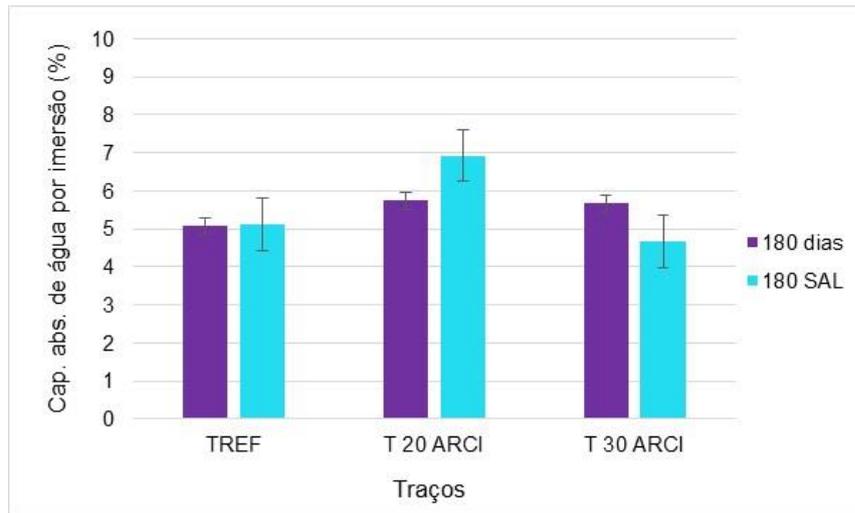
Aos 90 dias, a capacidade de absorção de água do T REF foi de 4,2%, enquanto que para os traços T 20 ARCI e T 30 ARCI a capacidade de absorção de água foi de 5,1% aproximadamente. A diferença entre T REF e os demais traços, T 20 ARCI e T 30 ARCI foi estatisticamente significativa.

Para a idade de 180 dias, houve um aumento na capacidade de absorção de água por imersão para todos os traços.

Estatisticamente os resultados da variável capacidade de absorção de água por imersão dos traços T 20 ARCI e T 30 ARCI foram similares entre si, e estatisticamente inferiores ao traço T REF, mostrando que a utilização do agregado natural, quando comparado ao agregado reciclado cimentício, apresenta melhores resultados para esta variável.

Os resultados da capacidade de absorção de água após imersão em solução salina são apresentados na Figura 54.

**Figura 54** - Resultados de capacidade absorção de água por imersão - Análise 2.



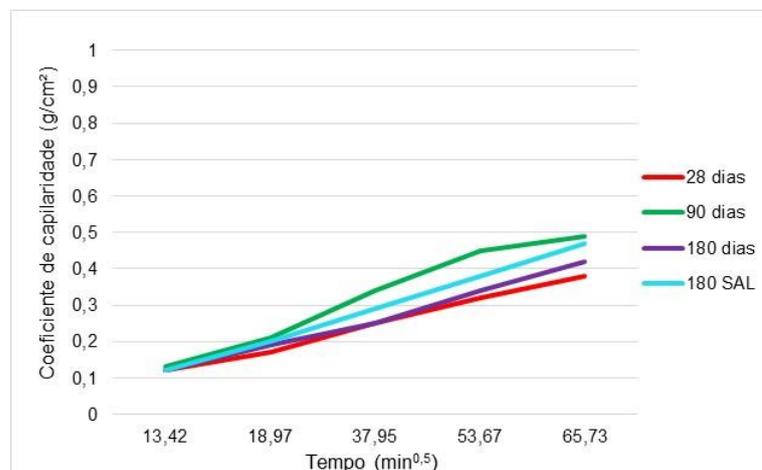
Fonte: da autora, 2018.

Nota-se na Figura 54, que a capacidade de absorção de água por imersão foi maior para o traço com 20% de substituição, T 20 ARCI, enquanto que os traços T REF (5,1%) e T 30 ARCI (4,8%) apresentaram valores similares de capacidade de absorção de água por imersão após 180 dias submersos em solução salina.

#### b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

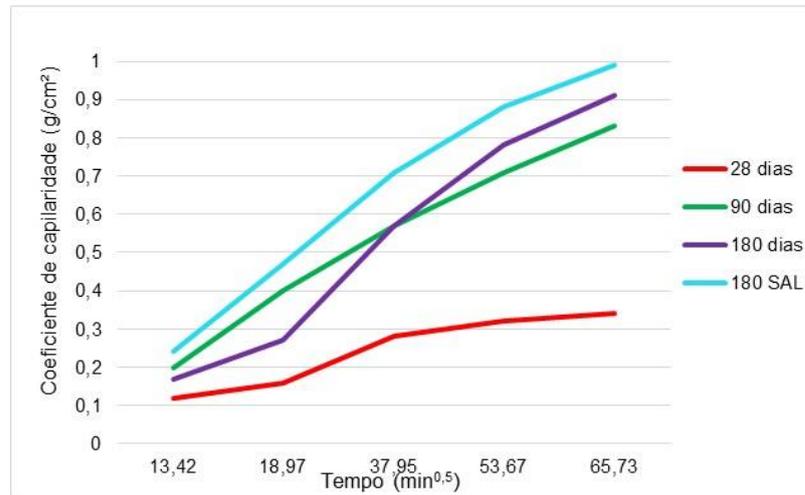
As Figuras 55, 56 e 57 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade para os traços presente nessa análise 2, T REF, T 20 ARCI e T 30 ARCI, respectivamente.

**Figura 55** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF.



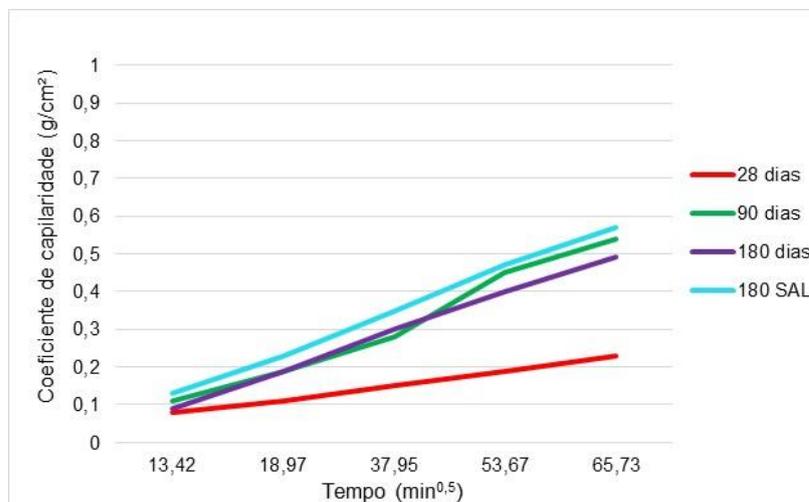
Fonte: da autora, 2018.

**Figura 56** - Resultado de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCI.



Fonte: da autora, 2018.

**Figura 57** - Resultado de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCI.



Fonte: da autora, 2018.

Para os resultados obtidos referentes à capacidade de absorção de água por capilaridade dos traços T REF, T 20 ARCI e T 30 ARCI, é possível observar que para todas as idades o menor coeficiente de capilaridade obtido foi aos 28 dias.

Nota-se nas figuras que para os traços utilizando agregado cimentício (T 20 ARCI e T 30 ARCI) na idade de 180 dias após imersão em solução salina foi obtido um coeficiente de capilaridade maior do que na a idade de 180 dias exposto a intempéries.

É possível observar que os resultados obtidos por T 20 ARCI foram superiores aos demais traços (T REF e T 30 ARCI). O maior coeficiente de capilaridade obtido

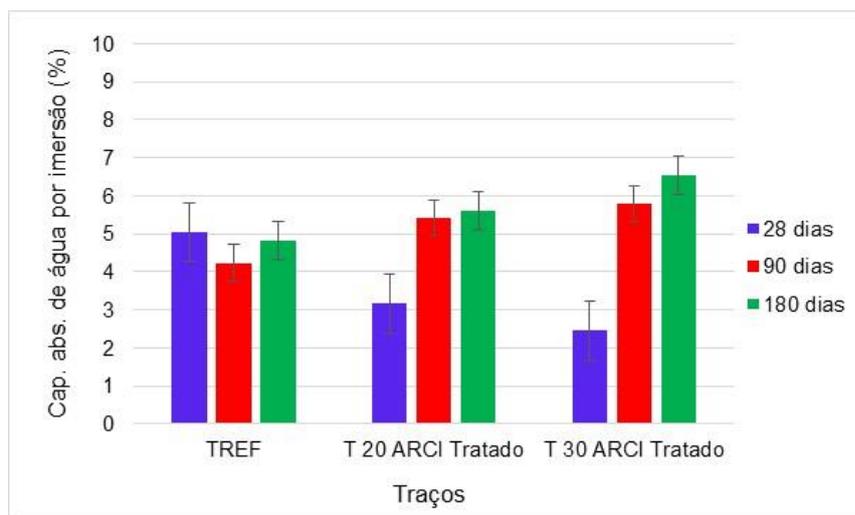
por T 20 ARCI atingiu, aproximadamente,  $1,0 \text{ g/cm}^2$ , enquanto que os demais atingiram  $0,5$  e  $0,6 \text{ g/cm}^2$  para T REF e T 30 ARCI, respectivamente.

### 6.3.3 Análise 3 – T REF *versus* T 20 ARCI Tratado *versus* T 30 ARCI Tratado;

#### a) Capacidade de absorção de água por imersão

A Figura 58 apresenta os resultados obtidos para capacidade de absorção de água por imersão dos concretos T REF, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado.

**Figura 58** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 3.



Fonte: da autora, 2018.

Na Figura 58, é possível observar que o T REF apresentou, aos 28 dias, capacidade de absorção de água por imersão maior do que os concretos produzidos com agregado reciclado (T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado). Porém, para as idades mais avançadas, de 90 dias e 180 dias, o comportamento foi inverso. O mesmo comportamento foi observado pela análise 2 que visava à comparação do agregado reciclado cimentício (T 20 ARCI e T 30 ARCI).

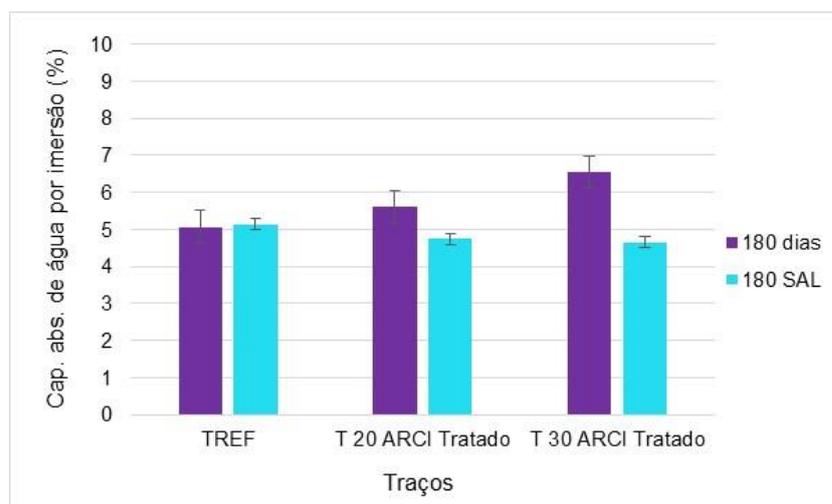
Aos 90 e aos 180 dias de idade, estatisticamente os resultados obtidos de capacidade de absorção de água por imersão para o traço T REF foram inferiores aos dos traços utilizando agregado reciclado (T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado), ou seja, a capacidade de absorção de água de T REF é menor do que a dos outros concretos.

Quando a comparação é realizada entre os traços T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado, com o objetivo de determinar se houve diferenças nos resultados

devido ao aumento no teor de substituição, nota-se, na Figura 58 que, para as idades de 28 e 90 dias, estes apresentaram resultados similares entre si. Porém, esse comportamento não foi observado aos 180 dias, quando o T 30 ARCI Tratado teve um aumento em sua capacidade de absorção de água por imersão, apresentando um resultado inferior quando comparado ao T 20 ARCI Tratado.

Os resultados de capacidade da absorção de água por imersão, após 180 dias imerso em solução salina, são apresentados na Figura 59.

**Figura 59** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 3.



Fonte: da autora, 2018.

Nota-se que os resultados de capacidade de absorção de água por imersão, após 180 dias em solução salina, foram similares entre os três traços (T REF, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado). Mas assim como nas análises 1 e 2, após a imersão em solução salina, a capacidade de absorção de água por imersão dos concretos utilizando agregado reciclado foi menor.

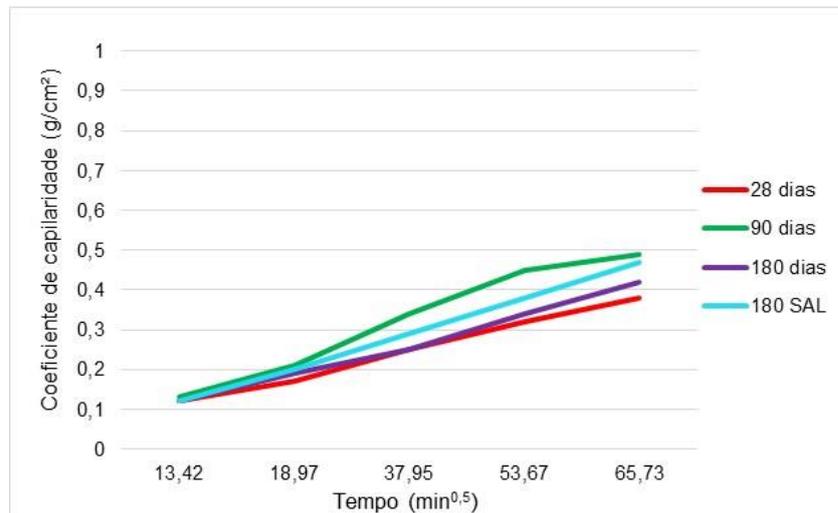
#### b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

Os resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade da análise 3 são apresentados nas Figuras 60, 61 e 62, representando T REF, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado, respectivamente.

Observa-se, nas Figuras 60, 61 e 62, que para os concretos produzidos com ARCI Tratado o mesmo comportamento observado na análise 2 se repete. Os valores de capacidade de absorção de água aumentaram com a idade.

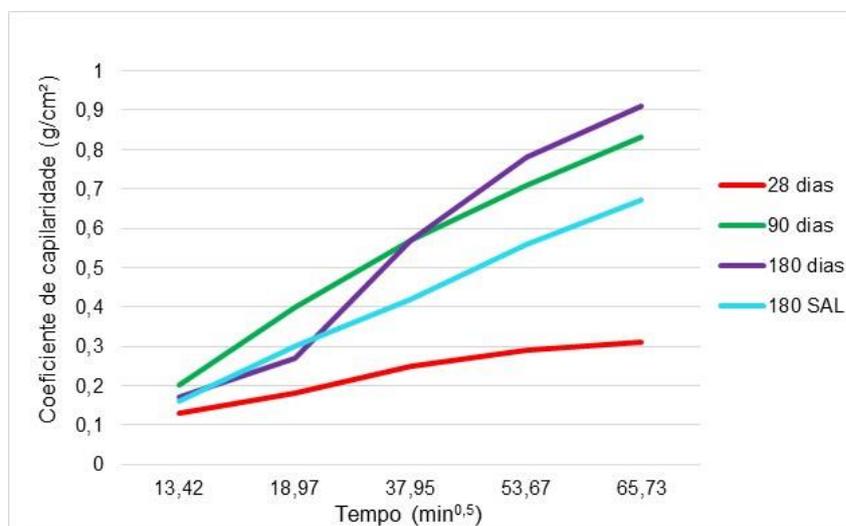
Para todos os traços, aos 90 dias foram obtidos resultados superiores de coeficiente de capilaridade, quando comparados às demais idades. Porém, como não ocorreu um crescimento gradativo para os traços T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado, os maiores coeficientes de capilaridade foram obtidos aos 180 dias para T 20 ARCI Tratado, atingindo 0,9 g/cm<sup>2</sup>, sendo o valor de 0,65 g/cm<sup>2</sup> para o traço T 30 ARCI Tratado aos 180 após imersão em solução salina.

**Figura 60** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T REF.



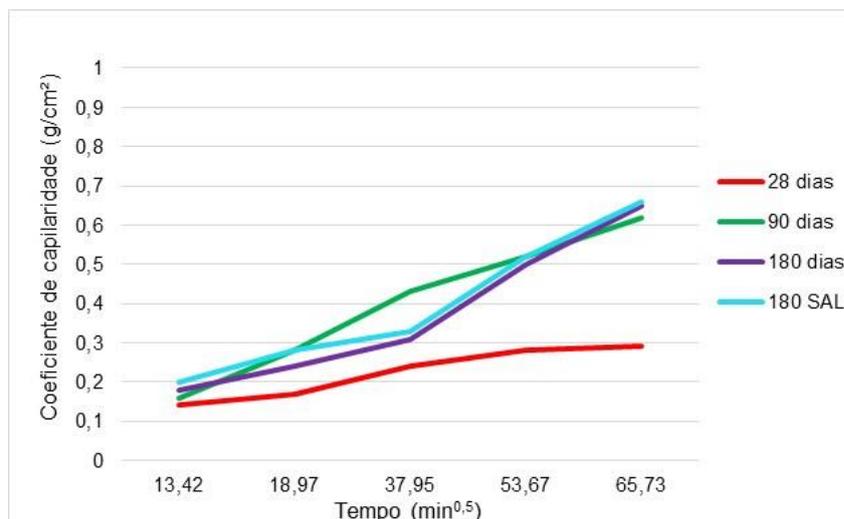
Fonte: da autora, 2018.

**Figura 61** – Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 20 ARCI Tratado.



Fonte: da autora, 2018.

**Figura 62** - Resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade para T 30 ARCI Tratado.



Fonte: da autora, 2018.

Por meio dos resultados, torna-se possível afirmar que, para a capacidade de absorção de água por capilaridade, o T 30 ARCI Tratado apresentou resultados melhores que T 20 ARCI Tratado, representando para essa análise o traço que apresentou os resultados mais próximos do que o T REF.

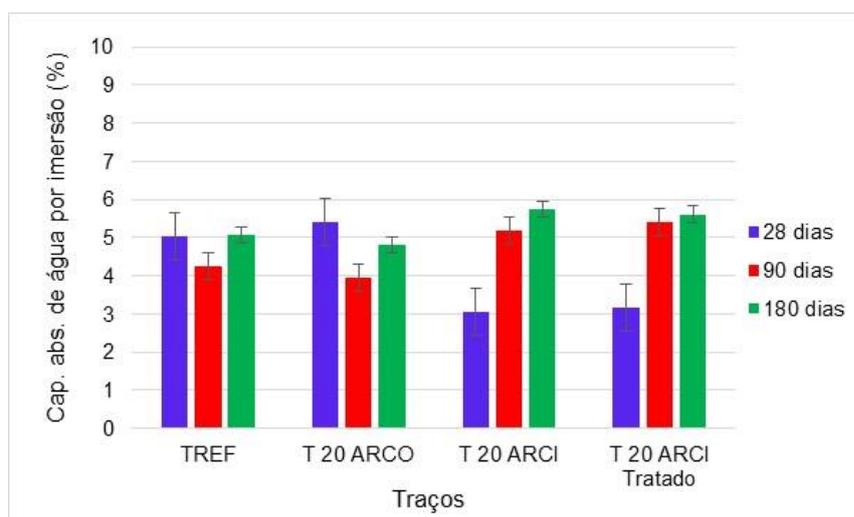
#### 6.3.4 Análise 4 – T REF *versus* T 20 ARCO *versus* T 20 ARCI *versus* T 20 ARCI Tratado;

##### a) Capacidade de absorção de água por imersão

Os resultados de capacidade de absorção de água por imersão referentes aos traços são apresentados na Figura 63.

Nota-se, na Figura 63, que o único traço que apresenta o mesmo comportamento que o T REF (diminuição da capacidade de absorção de água dos 28 dias para os 90 dias) foi o T 20 ARCO. Estatisticamente, T 20 ARCO foi o único que apresentou resultados similares ao T REF para esta variável.

O comportamento de T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado para a variável capacidade de absorção de água por imersão foi estatisticamente similar, comprovando que, para essa característica física e para esse teor de substituição, o tratamento efetuado no agregado cimentício não trouxe benefício.

**Figura 63** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 4.

Fonte: da autora, 2018.

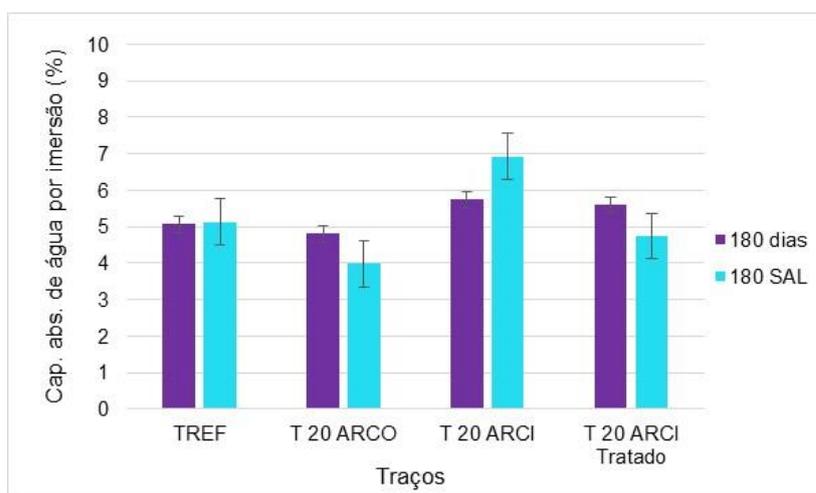
O T 20 ARCO, produzido com 20% de agregado reciclado de concreto foi, o que apresentou os melhores resultados frente à capacidade de absorção de água por imersão, resultados estes que podem ser comparados ao traço utilizando agregado natural (T REF).

Cenalmor *et al.* (2015) apontaram que a substituição do agregado reciclado pelo agregado natural não deve ser superior a 20%, já que como resultado de seu trabalho, os autores obtiveram uma capacidade de absorção de água no valor de 5,7%, superior ao limite permitido pela EHE-08 (instrução espanhola para produção de concreto estrutural apresentada por Cenalmor *et al.* em 2015), que é de 5%. Nota-se na Figura 63, que os resultados obtidos neste trabalho para os concretos com teor de substituição de 20% foram similares ao obtido por Cenalmor *et al.* (2015), apresentando valores de capacidade de absorção de água de até 5,8%.

Quanto aos resultados obtidos após a imersão dos corpos de prova em solução salina, estes são apresentados na Figura 64.

Nota-se que o traço que melhor se comportou frente ao ataque em solução salina foi T 20 ARCO.

**Figura 64** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 4.



Fonte: da autora, 2018.

#### b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

Para a análise 4, cujo objetivo era o de comparar os tipos de agregados reciclados, mantendo o teor de substituição em 20%, os resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade estão apresentados na Figura 65.

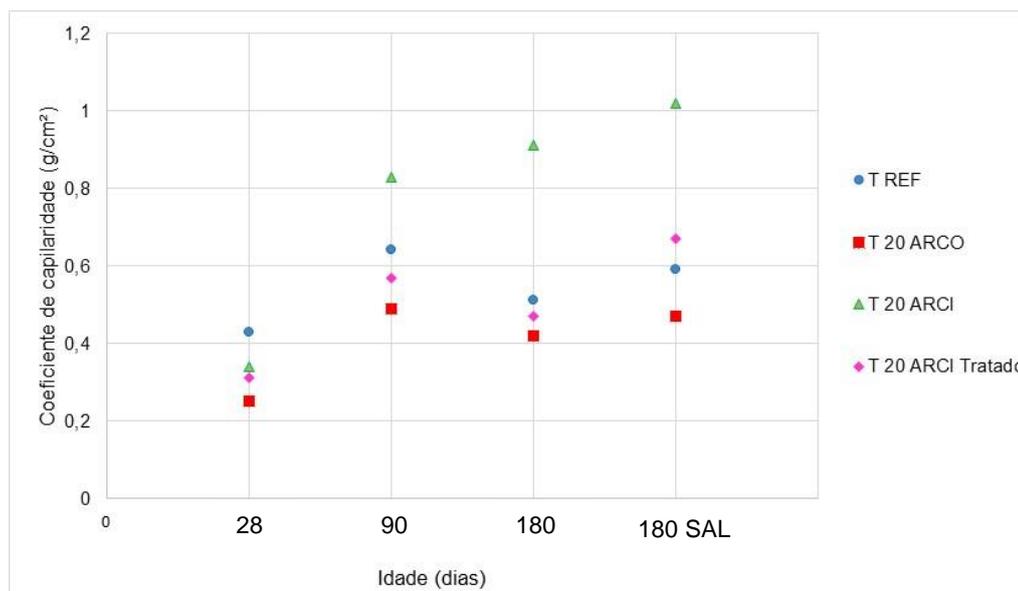
Como é possível observar na Figura 65, para a idade de 28 dias, T REF e T 20 ARCI apresentaram resultados similares entre si, enquanto T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado apresentaram coeficientes de capilaridade de 72 h menores do que estes.

Para as idades de 90 dias e 180 dias, T REF continua apresentando coeficientes de capilaridade de 72 h maior do que T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado, enquanto que, nesse caso, T 20 ARCI apresentou coeficientes maiores do que os demais traços.

Para a idade de 180 dias após imersão em solução salina T 20 ARCI continua apresentando coeficiente maior do que todos os outros três traços. Porém, T 20 ARCI Tratado apresentou um aumento no coeficiente de capilaridade de 72 h, tornando-se maior do que T 20 ARCO e T REF.

Aos 180 dias T 20 ARCO apresentou coeficiente de capilaridade menor que T REF.

**Figura 65** - Coeficiente de capilaridade de 72 h.



Fonte: da autora, 2018.

Observa-se ainda na Figura 65 que o concreto produzido com ARCI Tratado apresentou menor coeficiente de capilaridade e, portanto, melhor desempenho do que o concreto produzido com ARCI para o teor de substituição de 20%, indicando neste caso que o tratamento realizado no agregado cimentício foi eficiente.

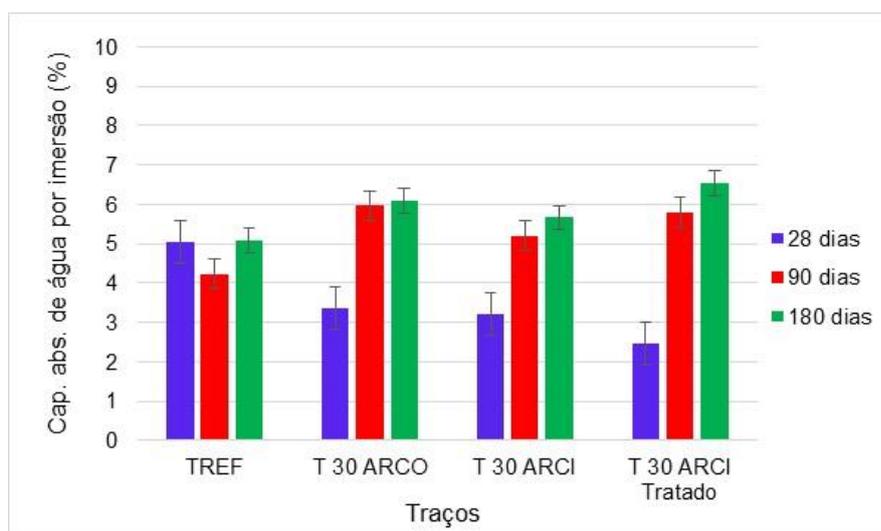
#### 6.3.5 Análise 5 – T REF *versus* T 30 ARCO *versus* T 30 ARCI *versus* T 30 ARCI Tratado;

##### a) Capacidade de absorção de água por imersão

A Figura 66 apresenta os resultados de capacidade de absorção de água por imersão dos traços utilizados para a análise 5.

Na Figura 66, é possível observar que, para a idade de 28 dias, o resultado de capacidade de absorção de água por imersão foi maior para o traço utilizando agregado natural do que para os traços utilizando agregados reciclados. Porém, para as idades mais avançadas esse comportamento não foi observado.

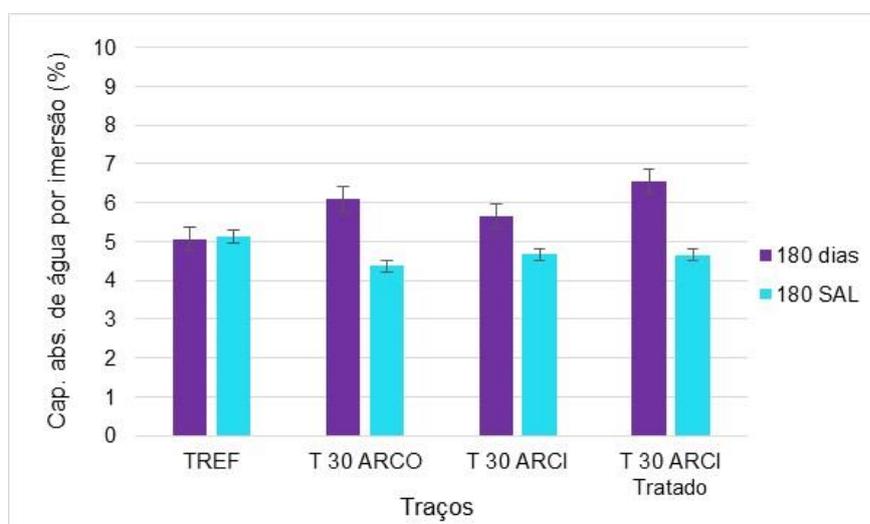
Aos 90 e 180 dias, os traços T 30 ARCO, T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado apresentaram resultados superiores e estatisticamente diferentes de T REF. Ou seja, a capacidade de absorção de água por imersão dos concretos produzidos com agregados reciclados foi superior, conseqüentemente, a entrada de gases e fluídos no interior do concreto é maior.

**Figura 66** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 5.

Fonte: da autora, 2018.

A Figura 67 apresenta os resultados de capacidade de absorção de água por imersão após ataque em solução salina.

Nesse caso, nota-se que os resultados de capacidade de absorção de água por imersão após 180 dias submersos em solução salina foram similares entre si, não apresentando diferença estatisticamente significativa entre os traços.

**Figura 67** - Resultados de capacidade de absorção de água por imersão - Análise 5.

Fonte: da autora, 2018.

Observa-se na Figura 67 que, após imersão em solução salina, a capacidade de absorção de água por imersão dos concretos produzidos com agregados

reciclados apresentou uma queda, essa queda pode ser explicada devido a cristalização do sal presente na solução salina.

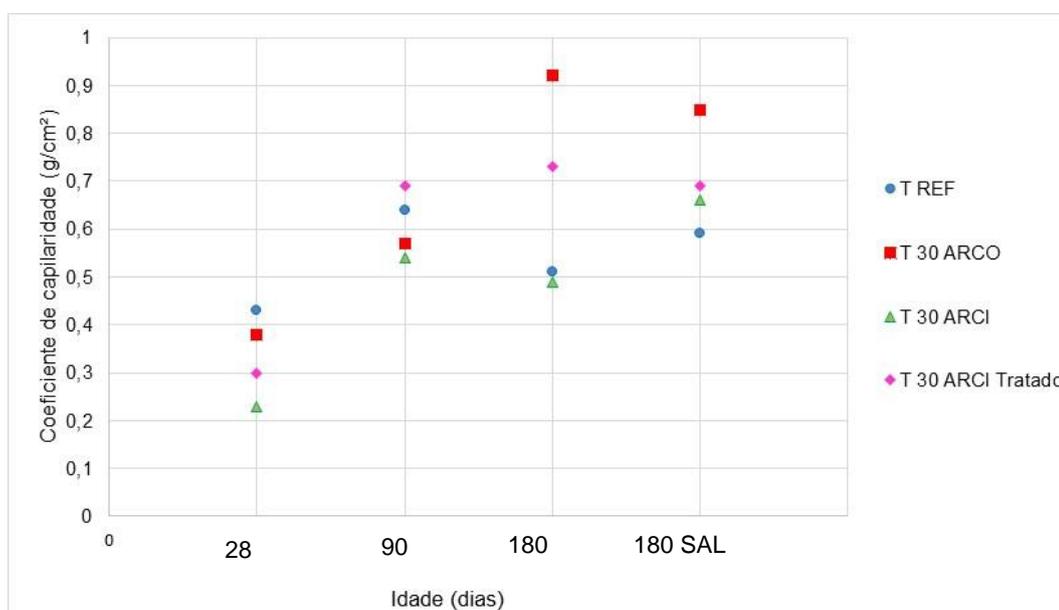
Estes sais podem ter cristalizado no interior do concreto, em seus poros, ocupando espaço e, conseqüentemente, diminuindo a capacidade de absorção de água por imersão destes concretos. O comportamento do concreto referência não foi o mesmo já que, segundo as literaturas, espera-se que concretos utilizando agregados reciclados sejam mais porosos do que os concretos convencionais.

#### b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

A Figura 68 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade para os traços T REF, T 30 ARCO, T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado, respectivamente.

Para a análise referente ao tipo de agregado, efetuada para o teor de substituição de 30%, é possível observar, na Figura 68, que para a idade de 28 dias, o T REF foi o que apresentou o maior coeficiente de capilaridade após 72 h. Todos os traços utilizando agregado reciclado apresentarem coeficientes de 72 h aos 28 dias menores que T REF.

**Figura 68** – Coeficiente de capacidade de absorção de água por capilaridade para 72 h.



Fonte: da autora, 2018.

Aos 90 dias, T 30 ARCO e T 30 ARCI apresentaram coeficientes de capilaridade menores do que o T REF, enquanto que T 30 ARCI Tratado apresentou resultado superior ao T REF.

Para as idades de 180 dias e 180 dias após imersão em solução salina, o traço T 30 ARCO foi o que apresentou o maior coeficiente de capilaridade de 72 h, seguido dos traços T 30 ARCI Tratado e T 30 ARCI.

O traço T 30 ARCO apresentou os coeficientes de capilaridade mais altos nas idades de 180 dias e 180 após imersão em solução salina.

Quando a comparação é realizada com os concretos utilizando agregado cimentício (T 30 ARCI) e o agregado cimentício tratado (T 30 ARCI Tratado) com o objetivo de determinar se o tratamento realizado no agregado reciclado apresentou melhoria nas características do concreto, nota-se, na Figura 68 que os resultados obtidos para o coeficiente de capilaridade de 72 h foram menores e melhores para o T 30 ARCI do que para T 30 ARCI Tratado, significando que para esse caso, não houve melhora na variável capacidade de absorção de água após o tratamento.

### 6.3.6 Permeabilidade ao ar

Para a determinação da permeabilidade do concreto ao ar, foi utilizado o equipamento *Porosscope*, com o qual se determinou o tempo necessário para o ar percorrer o interior do concreto. Em função do tempo medido, foi possível classificar o concreto quanto à sua permeabilidade.

A Tabela 16 apresenta a média dos resultados obtidos, em segundos, para cada traço utilizado neste trabalho. Consta, também, a classificação de cada traço de concreto em função da Tabela 5 apresentada anteriormente.

**Tabela 16** - Resultados ensaio de permeabilidade pelo equipamento *Porosscope*.

Permeabilidade		
Traço	Tempo (s)	Classificação
T REF	55,5	Moderado
T 20 ARCO	22,5	Pobre
T 20 ARCI	23,3	Pobre
T 20 ARCI Tratado	31,8	Moderado
T 30 ARCO	21,5	Pobre
T 30 ARCI	18,0	Pobre
T 30 ARCI Tratado	17,0	Pobre

Fonte: da autora, 2017.

Na Tabela 16, é possível observar que mesmo o concreto utilizando agregado natural (T REF) não apresentou uma boa classificação quanto a sua permeabilidade ao ar, sendo classificado como moderado e apresentando resultado entre 30 a 100 s. O único concreto que obteve classificação similar ao T REF foi o T 20 ARCI Tratado.

Assim como apresentado anteriormente, Cenalmor *et al.* (2015) apresentaram resultados de permeabilidade superficial ao ar, apontando que a substituição de até 50% do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto é aceitável para a utilização de concretos com fins estruturais. Como resultado, foi obtido que 75% dos casos apresentaram permeabilidade superficial ao ar classificados como satisfatórios, onde o tempo estimado de passagem do ar está entre 100 a 300 s.

Os resultados obtidos neste trabalho foram inferiores aos obtidos por Cenalmor *et al.* (2015). Todos os outros traços de concreto produzidos neste trabalho foram classificados como pobres quanto à permeabilidade ao ar. Porém, a relação a/c dos autores foi inferior a deste trabalho, sendo utilizado 0,5 e 0,6, respectivamente.

### 6.3.7 Carbonatação

A partir da definição da área carbonatada, utilizando-se o programa AutoCAD®, foi calculada a espessura de carbonatação ( $e$ ) em centímetros através da aplicação da Fórmula de Bháskara da equação de segundo grau, representada neste trabalho pela Equação 5 na página 63.

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos após a análise da área carbonatada.

Nota-se, na Tabela 17, que ambos os traços utilizando agregado reciclado de concreto (T 20 ARCO e T 30 ARCO) apresentaram área carbonatada e espessura carbonatada similares à área carbonatada e espessura carbonatada do traço T REF. Por sua vez, os demais traços apresentaram esses resultados de 3 a 5 vezes maiores que o traço T REF.

Com isso, pode-se observar que os traços produzidos com agregado reciclado de concreto (T 20 ARCO e T 30 ARCO) tiveram uma área carbonatada menor que os demais traços utilizando agregado reciclado ARCI e ARCI Tratado, comprovando que traços com uso de agregado reciclado tipo ARCO foram mais resistentes à entrada de gases do que os demais.

**Tabela 17 – Resultados de Carbonatação.**

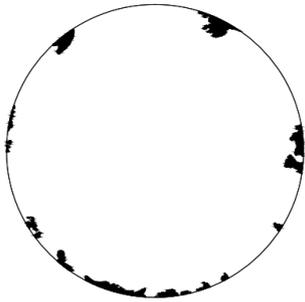
Carbonatação	Amostra	Área carbonatada (cm <sup>2</sup> )	e (cm)
T REF	1	1,96	0,127
	2	1,17	0,076
T 20 ARCO	1	2,09	0,134
	2	2,18	0,139
T 20 ARCI	1	6,56	0,431
	2	5,56	0,363
T 20 ARCI TRATADO	1	4,78	0,312
	2	7,98	0,522
T 30 ARCO	1	2,57	0,165
	2	2,47	0,159
T 30 ARCI	1	8,02	0,524
	2	7,38	0,483
T 30 ARCI TRATADO	1	3,28	0,211
	2	4,83	0,312

Fonte: da autora, 2017.

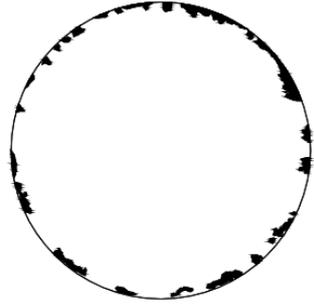
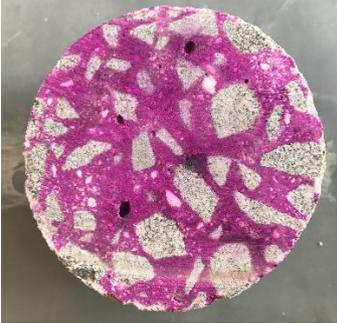
Quando comparado à carbonatação dos traços produzidos com agregado cimentício e com o agregado cimentício tratado, é possível observar que para o teor de substituição de 20% não houve diferença entre os resultados para T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado. Por sua vez, para o teor de substituição de 30%, houve uma diminuição da área carbonatada de T 30 ARCI para T 30 ARCI Tratado, demonstrando que, para teores de substituição maiores, o tratamento foi mais efetivo.

A Tabela 18 apresenta o caso menos favorável de cada traço, ou seja, a amostra que apresentou a maior área carbonatada e espessura de carbonatação, juntamente com o estudo de imagem realizado utilizando o programa AutoCAD®.

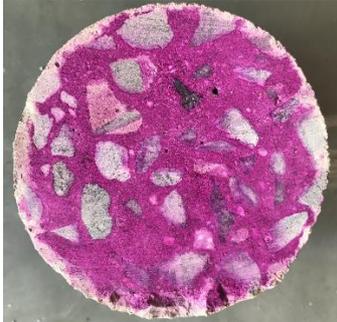
**Tabela 18 - Estudo de imagens realizado para determinação da área de carbonatação.**

Traço - Amostra	Fotografia da amostra	Análise da imagem
T REF – Amostra 01		

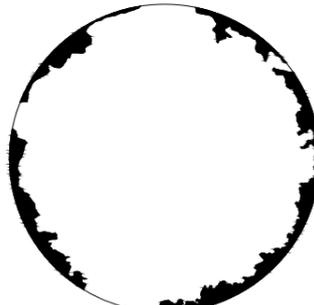
T 20 ARCO –  
Amostra 02



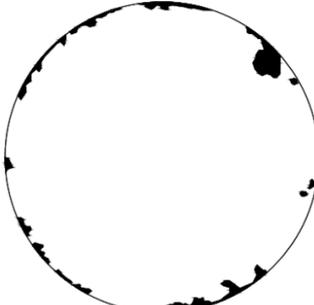
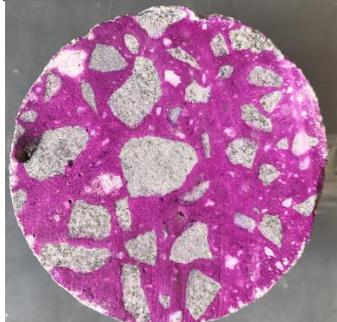
T 20 ARCI – Amostra  
01



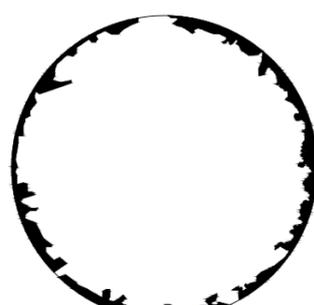
T 20 ARCI Tratado –  
Amostra 02



T 30 ARCO –  
Amostra 01



T 30 ARCI – Amostra  
01





Fonte: da autora, 2017.

### 6.3.8 Penetração de íons cloreto

Para o ensaio indireto de penetração de íons cloreto, a metodologia de análise de imagens utilizada foi a mesma empregada para o ensaio de carbonatação.

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos na análise de imagem. Primeiramente foi definido através das imagens a área penetrada pelos íons cloreto. Após essa definição foi determinada a espessura média de penetração de íons cloreto, utilizando-se a fórmula de Bhaskára conforme a Equação 5.

**Tabela 19** - Resultados de penetração de íons cloreto.

Penetração de íons cloreto	Amostra	Área penetrada (cm <sup>2</sup> )	e (cm)
T REF	1	17,60	1,189
	2	17,54	1,187
T 20 ARCO	1	18,55	1,261
	2	22,98	1,589
T 20 ARCI	1	20,70	1,418
	2	17,08	1,154
T 20 ARCI TRATADO	1	10,39	0,685
	2	10,07	0,663
T 30 ARCO	1	10,75	0,709
	2	10,89	0,719
T 30 ARCI	1	15,24	1,022
	2	13,92	0,929
T 30 ARCI TRATADO	1	18,76	1,276
	2	17,21	1,163

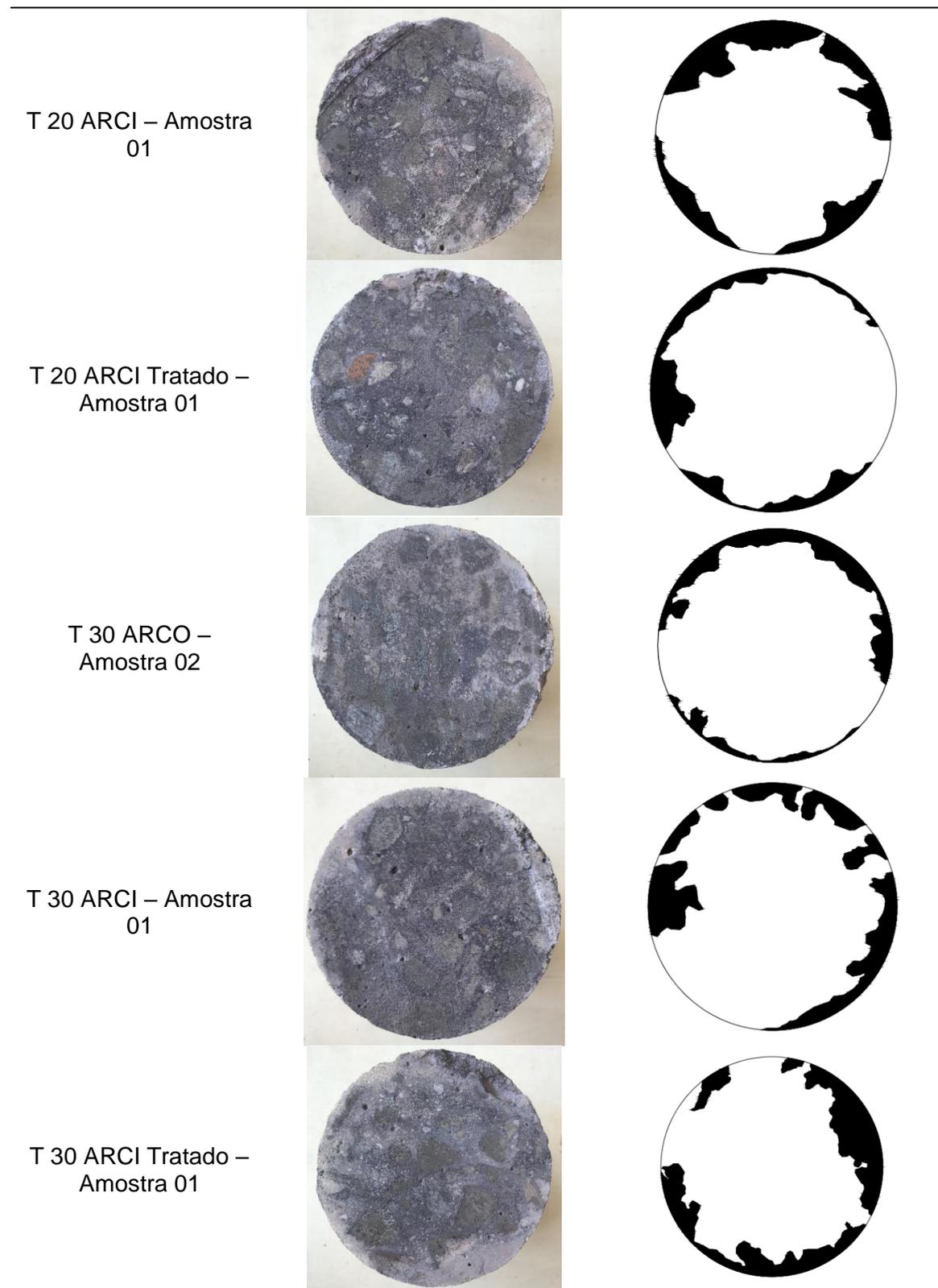
Fonte: da autora, 2017.

Nota-se, na Tabela 19, que em nenhum dos casos a espessura de penetração ultrapassou 1,5 cm. Vale ressaltar, que os concretos produzidos para este trabalho atendem às classes de agressividade 1 e 2 da norma NBR 12655 (ABNT, 2015), e que para essas duas classes de agressividade, a NBR 6118 ABNT, 2014) define um cobrimento mínimo de 20 e 25 mm para laje, 25 e 30 mm para viga/pilar, e 30 mm para elementos estruturais em contato com o solo, para as classes de agressividade 1 e 2, respectivamente. Além do cobrimento mínimo ainda deve ser adicionado na construção da estrutura o cobrimento mínimo acrescido de tolerância de execução, que deve ser de, pelo menos, mais 10 mm.

A Tabela 20 apresenta a análise de imagem do caso mais desfavorável de cada traço, ou seja, da amostra que apresentou a maior penetração de íons cloreto e área penetrada.

**Tabela 20** - Estudo de imagens realizado para determinação da área de penetração de íons cloreto.

Traço - Amostra	Fotografia da amostra	Análise da imagem
T REF – Amostra 01		
T 20 ARCO – Amostra 02		



Fonte: da autora, 2017.

Nesse caso, os traços que apresentaram a menor espessura de penetração de íons cloreto foram o T 20 ARCI Tratado e o T 30 ARCO. Esses traços apresentaram resultados de penetração de íons cloreto menores do que o T REF.

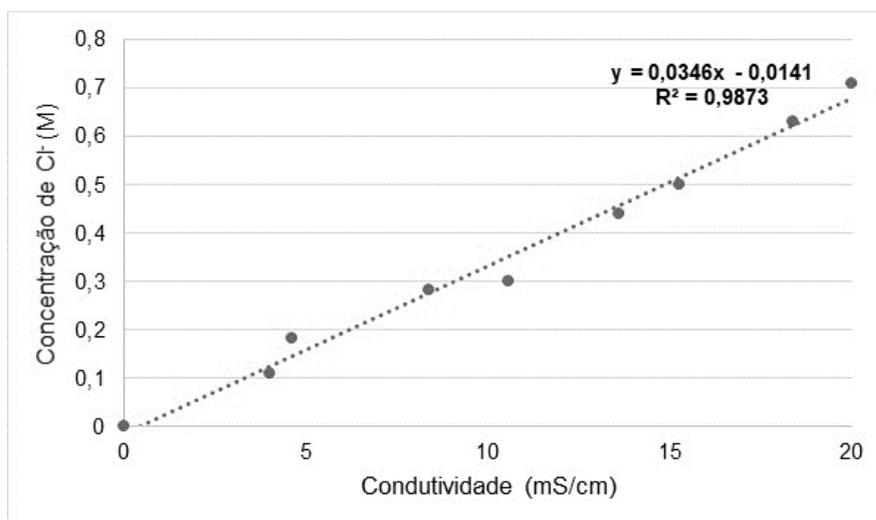
### 6.3.9 Migração de íons cloreto

Para que fosse possível determinar a concentração de íons cloreto através da condutividade, medida pela caneta condutivímetro, foi determinado através da análise de titulação por nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) a curva de calibração entre a concentração de cloretos (M) e a condutividade (mS/cm).

Foi obtida então a reta de calibração da concentração de íons cloreto com a condutividade. A Figura 69 apresenta a reta de calibração.

Nota-se, através da Figura 69, que o  $R^2$  obtido foi de 0,9873, apresentando assim, boa correlação da condutividade *versus* a concentração de íons cloreto.

**Figura 69** - Reta de calibração entre a concentração de cloretos (M) e a condutividade (mS/cm).



Fonte: da autora, 2018.

Como a reta de calibração apresentou uma boa correlação entre a concentração de cloretos e a condutividade, foi utilizada a caneta condutivímetro para o ensaio de migração, já que essa metodologia é mais simples e de menor custo. A condutividade foi obtida através da medição pela caneta condutivímetro e, através da Equação 6, foi determinada a concentração de cloretos do ensaio de migração de íons cloreto.

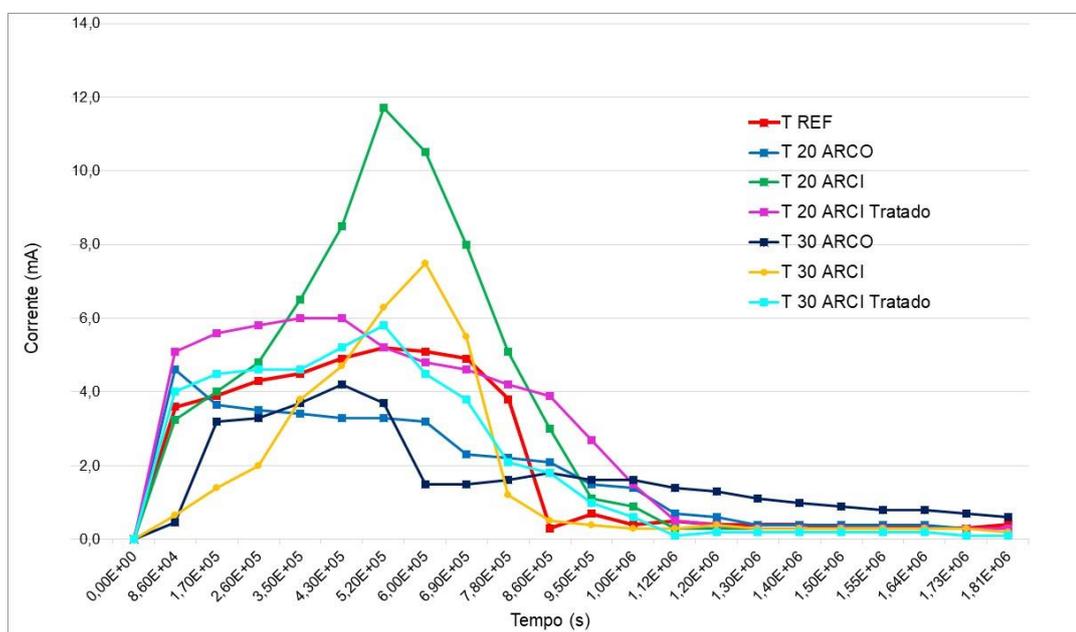
$$\text{Concentração de cloretos} = (0,0346 \times \text{Condutividade}) - 0,0141 \quad (6)$$

O ensaio de migração de íons cloreto foi realizado durante o período de um mês. Todos os dias foram coletados para cada célula a temperatura da água, a corrente elétrica passante e a condutividade da água no compartimento anódico. Os resultados obtidos serão apresentados na sequência.

a) Análise do monitoramento da corrente elétrica

A Figura 70 apresenta os resultados, para todos os traços, da corrente elétrica passante durante o ensaio; e a Tabela 21 apresenta os picos de corrente apresentados por cada traço

**Figura 70** – Monitoramento da corrente elétrica durante o ensaio de migração de íons cloreto.



Fonte: da autora, 2018.

**Tabela 21** - Picos de corrente obtidos através do ensaio de migração de íons cloreto.

Traços	Pico de corrente (mA)
T REF	5,2
T 20 ARCO	5,1
T 20 ARCI	11,7
T 20 ARCI Tratado	6,0
T 30 ARCO	4,2
T 30 ARCI	7,5
T 30 ARCI Tratado	5,8

Observa-se, na Figura 70, que o comportamento da corrente elétrica no ensaio de migração de íons cloreto foi similar para todos os traços. Inicialmente a corrente medida no ensaio é zero mA e vai subindo gradativamente até atingir o seu pico e, na sequência, diminui até que o valor atingido seja praticamente zero mA.

Nota-se, que o concreto que atingiu o maior pico de corrente elétrica foi o T 20 ARCI com cerca de 12 mA, resultado esse extremamente superior quando comparado

ao T REF que atingiu o pico de corrente elétrica no 5,0 mA. Medeiros Junior (2014) apontou que quanto maior o pico da corrente maior a facilidade com que a corrente elétrica teve em percorrer através do concreto, significando que o concreto apresenta maior permeabilidade.

O resultado de pico de corrente elétrica obtido para o concreto T 20 ARCI coincide com o comportamento apresentado no ensaio de capacidade de absorção de água por imersão, em que, a absorção de água de T 20 ARCI foi superior aos demais concretos. Com isso, é possível afirmar que este concreto apresentou maior facilidade na entrada e passagem de substâncias em seu interior.

Além do concreto T 20 ARCI, o T 30 ARCI também apresentou pico de corrente elétrica alto, sendo o segundo maior pico, atingindo 7,5 mA. Com esses resultados, afirma-se que o agregado reciclado cimentício apresentou uma maior facilidade na passagem da corrente elétrica pelo concreto, demonstrando que esse tipo de agregado pode ser aquele que apresentou a maior permeabilidade.

O T 30 ARCO foi o concreto que obteve o melhor resultado, cujo pico de corrente foi menor do que o traço referência (T REF), que atingiu 5,0 mA, enquanto que o traço com agregado reciclado apresentou pico de corrente no valor de 4,0 mA.

Para a análise de corrente elétrica, os traços utilizando 30% de agregado reciclado apresentaram melhores resultados que os traços utilizando 20% de agregado reciclado. E, quando comparado T 20 ARCI com T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI com T 30 ARCI Tratado, com o objetivo de determinar se o tratamento realizado no agregado reciclado melhorou os resultados obtidos, observa-se na Figura 70, que os picos de corrente foram melhores e menores para os traços utilizando o agregado reciclado cimentício tratado, podendo significar que o tratamento realizado no agregado reciclado teve efeito positivo no concreto e melhorou os resultados obtidos nesse ensaio.

#### b) Cálculo dos coeficientes de difusão no estado estacionário

Para a determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário, foi utilizado a Equação 3, além da curva de concentração de íons cloreto apresentada na Figura 71. Os resultados são apresentados na Figura 72.

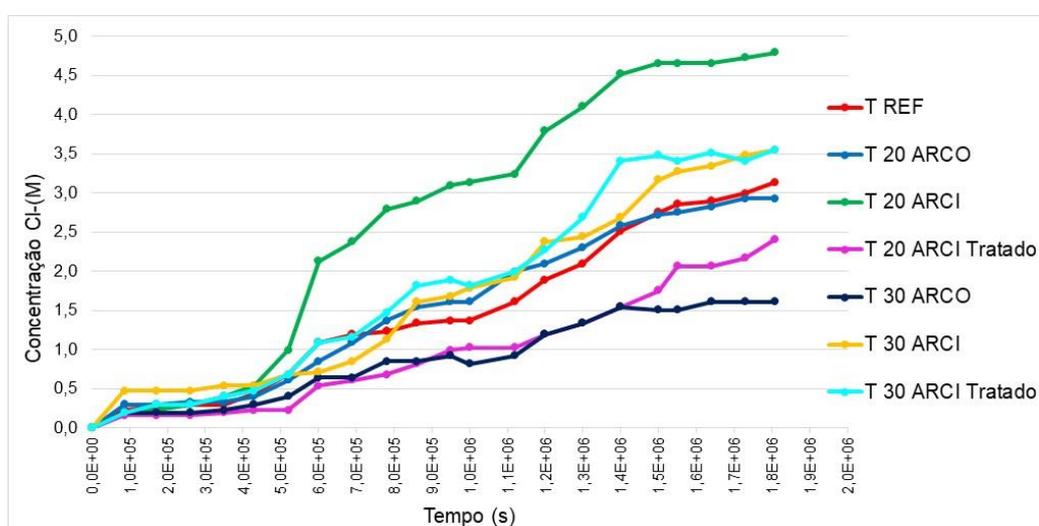
A Figura 71 apresenta a concentração de cloretos no compartimento anódico em função do tempo (em segundos). A partir destas curvas foi realizado o cálculo da

inclinação da curva no estado estacionário, necessária para o cálculo do coeficiente de difusão no estado estacionário.

Observa-se que para o traço T 20 ARCI a água no compartimento anódico atingiu a maior concentração. Comportamento similar a análise realizada e demonstrada na Figura 71. Com isso, é possível afirmar que a migração de íons cloreto ocorreu com maior facilidade na amostra do traço T 20 ARCI.

Para a concentração do teor de íons cloreto, o concreto T 30 ARCO apresentou a menor passagem de íons cloreto, podendo significar que esse traço de concreto foi mais resistente à passagem dos íons.

**Figura 71** – Concentração de íons cloreto no compartimento anódico.



Fonte: da autora, 2018.

Como é observado na Figura 71, os traços T 20 ARCO, T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCO apresentaram menores concentrações de íons cloreto que o T REF, significando que esses traços apresentaram menor permeabilidade e maior dificuldade à passagem dos íons cloreto. Os concretos T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado apresentaram uma concentração de cloretos similares entre si.

A Figura 72 apresenta os coeficientes de difusão no estado estacionário obtidos nesse ensaio. Observa-se, na Figura 72, que o coeficiente no estado estacionário para o traço do T 20 ARCI atingiu o valor de aproximadamente  $1,0E-09$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , sendo o maior coeficiente quando comparado aos demais traços. Para esse traço, é possível concluir, através das análises realizadas nas Figuras 76, 77 e 78, que foi o concreto que apresentou maior facilidade à passagem dos íons cloreto, o que pode ter ocorrido

devido à alta permeabilidade do concreto. Esse resultado não pode ser atribuído somente ao tipo de agregado reciclado porque os resultados obtidos com o T 30 ARCI foram melhores do que T 20 ARCI, sendo que se trata do mesmo tipo de agregado, porém com um teor de substituição maior.

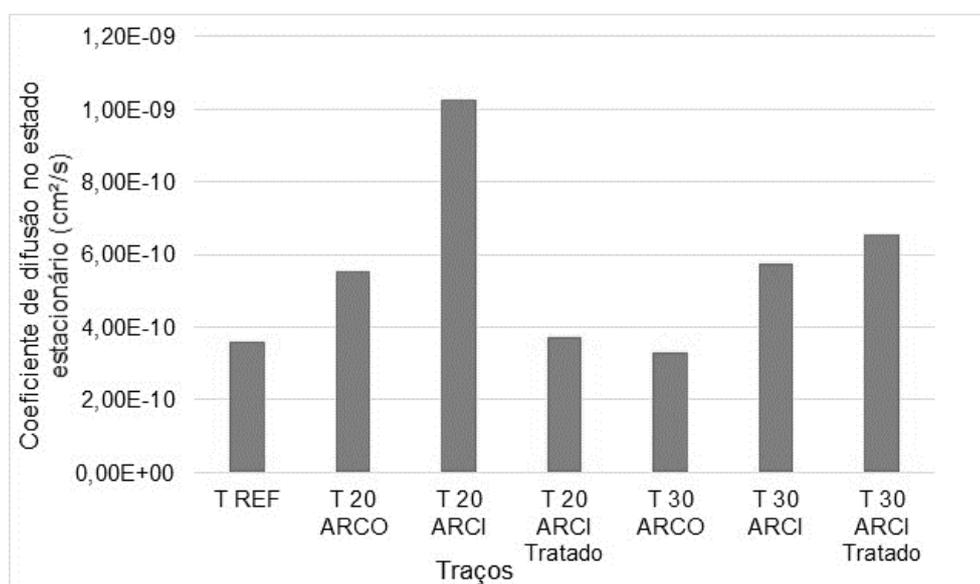
Os traços T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCO apresentaram coeficientes de difusão similares ao T REF, atingindo valores de aproximadamente  $3,9E-10$  cm<sup>2</sup>/s,  $3,2E-10$  cm<sup>2</sup>/s e  $3,7E-10$  cm<sup>2</sup>/s, respectivamente.

Os concretos T 20 ARCO, T 30 ARCI e T 30 ARCI Tratado apresentaram resultados superiores nos coeficientes de difusão no estado estacionário do que o T REF, atingindo valores de aproximadamente  $5,8E-10$  cm<sup>2</sup>/s para T 20 ARCO e T 30 ARCI e  $6,3E-10$  cm<sup>2</sup>/s para T 30 ARCI Tratado.

Quando comparados os traços utilizando agregado cimentício *versus* agregado cimentício tratado houve uma melhora no valor obtido do coeficiente no estado estacionário para o teor de 20%, enquanto que para o teor de 30% o resultado obtido por T 30 ARCI Tratado foi maior que T 30 ARCI, significando que o tratamento não correspondeu às expectativas de melhora.

Quanto ao teor de substituição, nota-se que para os traços T 20 ARCO, T 30 ARCO, T 20 ARCI e T 30 ARCI, foram obtidos os melhores resultados para os traços com teor de substituição de 30%. Por sua vez, para T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado os resultados obtidos foram melhores para o teor de substituição de 20%.

**Figura 72** - Resultados dos coeficientes de difusão no estado estacionário.



Fonte: da autora, 2018.

Medeiros Junior (2014) obteve, para o concreto utilizando cimento CPV-ARI com relação a/c igual à utilizada nesse trabalho (0,6), o coeficiente de difusão no estado estacionário no valor de, aproximadamente,  $5,8E-08 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Esse valor foi extremamente superior aos obtidos neste trabalho.

O maior coeficiente de difusão obtido neste trabalho foi para o traço T 20 ARCI, atingindo cerca de  $1,0E-09 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

#### 6.3.10 Discussão dos resultados

Mehta e Monteiro (1994) apontaram que as características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto são: porosidade, granulometria, absorção de água, resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os autores apontaram que estas características são derivadas da composição mineralógica da rocha matriz.

Neville (1997) demonstrou que até a forma dos agregados é importante. Segundo o autor, conforme aumenta a quantidade de agregado arredondado, a porcentagem de vazios diminui, e o volume de vazios tem influência direta sobre a massa específica do concreto. O comportamento obtido com os concretos produzidos com ARCO (T 20 ARCO e T 30 ARCO), em que, para alguns ensaios os resultados apresentados foram superiores e/ou melhores do que os demais concretos, inclusive quando comparado ao concreto convencional, pode ser explicado pelas características deste agregado, sendo forma, índice de vazios, porosidade, e até mesmo granulometria.

O autor afirmou também que a qualidade dos agregados não só reduz a resistência do concreto, mas também compromete a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

Por isso o estudo e o entendimento das características de um agregado se fazem importantes. Ser mais poroso, ou apresentar maior teor de finos, contribui diretamente para as principais características do concreto e, conseqüentemente, impacta sobre os resultados finais.

Para a análise das características físicas do concreto, foram realizados os ensaios de capacidade de absorção de água por imersão e a capacidade de absorção de água por capilaridade.

Quando se comparou o teor de substituição, foi possível observar que a porosidade do agregado reciclado afetou diretamente na absorção de água do concreto.

Na primeira análise, cujo objetivo era o de comparar o agregado reciclado de concreto, é possível observar que, para as características físicas do concreto, o teor de substituição de 20% utilizando agregado reciclado de concreto (T 20 ARCO) conseguiu manter as características do concreto convencional (T REF). O traço produzido com a substituição de 30% (T 30 ARCO) apresentou um aumento na capacidade de absorção de água por imersão de 1,0%.

Para a análise dos traços com agregado cimentício e dos traços com agregado cimentício tratado, em nenhum dos casos os resultados obtidos para as características físicas do concreto foram iguais ao T REF. Ou seja, houve um aumento na capacidade de absorção de água, que conseqüentemente facilita a entrada e saída de gases e líquidos no interior do concreto.

Afroughsabet *et al.* (2017), assim como neste trabalho, obtiveram resultados superiores ao concreto referência nos ensaios de resistência à compressão axial em alguns casos. Porém, a capacidade de absorção de água dos concretos produzidos com agregado reciclado foi superior ao concreto convencional para todos os tipos de agregados e de substituições.

Porém, para os traços com agregado cimentício (T 20 ARCI e T 30 ARCI) os melhores resultados foram obtidos para o teor de substituição de 30%, enquanto que, para os traços utilizando agregado cimentício tratado (T 20 ARCI Tratado e T 30 ARCI Tratado), os melhores resultados foram obtidos para teor de substituição de 20%.

Quando o teor de substituição foi fixado em 20%, e o objetivo é o de determinar qual agregado apresentou melhor comportamento frente as características físicas do concreto, foi observado que o traço utilizando agregado reciclado de concreto (T 20 ARCO) apresentou resultados similares ao T REF na variável capacidade de absorção de água por imersão, enquanto que, os demais traços apresentaram resultados maiores do que o T REF.

Para a variável capacidade de absorção de água por capilaridade, T 20 ARCO e T 20 ARCI Tratado apresentaram coeficiente de capilaridade inferiores a T REF, porém os melhores resultados foram obtidos por T 20 ARCO.

Pereira (2011), assim como Mehta e Monteiro (2008), apresentaram que concretos com maiores resistências à compressão tendem a apresentar menores

valores de absorção de água por capilaridade. Este comportamento foi observado para os traços com teor de substituição de 20%, pois quanto maior a resistência, menor os valores do coeficiente de capilaridade.

Troian (2010) apontou que para todos os traços com agregado reciclado estudados, independentemente da classe de resistência ou da relação a/c, a capacidade de absorção de água aumentou, quando comparados com o traço referência. Esse comportamento não foi observado para o teor de substituição de 20%, cujo resultados apresentados para o T 20 ARCO foram em alguns casos até melhores do que o T REF

Quando o teor de substituição foi aumentado para 30%, notou-se que, nenhum dos resultados obtidos, nem para a variável capacidade de absorção de água por imersão e nem para capilaridade, atingiram os resultados do traço T REF. Além disso, para as características físicas, o aumento de 20 para 30% impacta diretamente nos resultados, já que, pelo agregado reciclado ser mais poroso do que o agregado natural, quando maior a quantidade deste material no concreto, maior será a permeabilidade e a absorção de água deste concreto, tornando a entrada de líquidos e gases maior.

Cenalmor *et al.* (2015) apontaram que a substituição do agregado reciclado pelo agregado natural não deve ser superior a 20%, pois os autores obtiveram uma capacidade de absorção de água em torno de 5,7% para os traços com teor de substituição de 20%, já que este resultado está próximo ao valor especificado pela norma EHE-08. Porém, mesmo que nenhum dos traços com teor de substituição de 30% tenham apresentado resultados estatisticamente similares ao T REF, a capacidade de absorção de água por imersão não ultrapassou 6,0%.

Cenalmor *et al.* (2015) ainda apontaram que existem normas europeias que limitam a capacidade de absorção de água do concreto de até 7%, facilitando assim, a utilização do agregado reciclado na produção de concreto estrutural, já que, se o limite de capacidade de absorção de água por imersão fosse especificada em 7%, todos os agregados utilizados para a produção dos concretos deste trabalho poderiam ser utilizados, já que nenhum dos resultados obtidos de capacidade de absorção de água foi superior a 7%.

A NBR 15116 (ABNT, 2004a) permite a utilização de agregado graúdo reciclado para fins não estruturais com capacidade de absorção de água limite de 7% para o ARC, e de 12% para o ARM. No caso deste trabalho, os agregados reciclados

apresentaram capacidade de absorção de água superiores aos limites da norma, porém para a capacidade de absorção de água por imersão do concreto, todos os concretos obtiveram resultados inferiores a 7%.

Quando a comparação é realizada entre o agregado cimentício e o agregado cimentício tratado, é possível observar que, para os teores de substituição de 20% e de 30% não houve diferença entre os resultados obtidos, confirmando que o tratamento realizado no agregado cimentício não melhorou os resultados.

Afroughsabet *et al.* (2017) apontaram que, independentemente da qualidade do agregado reciclado, o seu uso no concreto afeta diretamente as propriedades vinculadas à durabilidade. Os autores observaram um aumento na capacidade de absorção de água para o traço com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, e apontaram que esse aumento pode ser explicado pela porosidade do agregado reciclado, que é maior do que a do agregado natural.

Por isso, há a necessidade de efetuar-se o controle no teor de substituição, para que o aumento da capacidade de absorção de água não afete de forma significativa a durabilidade do concreto.

O comportamento mais distante do T REF para este trabalho foi do concreto produzido com agregado cimentício, principalmente para o teor de substituição de 20% (T 20 ARCI). Para os ensaios de medição indireta da durabilidade, o tratamento realizado melhorou os resultados apresentados nos ensaios de penetração de íons cloreto e migração de íons cloreto, podendo significar, que para a entrada e passagem de íons cloreto, o tratamento foi efetivo. No restante dos casos, não houve diferença significativa.

Quando a análise é realizada em função do teor de substituição, em alguns casos e tipos de ensaios, o teor de substituição de 30% apresentou melhores resultados (migração de íons cloreto). Em outros ensaios de medição indireta, não houve diferença nos resultados apresentados a partir do teor de substituição (carbonatação e penetração de íons cloreto).

Porém, era esperado que quanto maior fosse o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, maior seria a perda das características do concreto convencional, apresentando assim um concreto mais poroso, com maior capacidade de entrada e saída de gases e fluídos, com menor resistência, maior capacidade de absorção de água. Para este trabalho, o aumento do teor de

substituição de 20 para 30% para os ensaios de medição indireta, não impactou nos resultados.

Omrane *et al.* (2017) apontou que, para a produção de concreto auto adensável, a utilização de agregados reciclados miúdo e graúdo é uma ótima solução para uma produção limpa. Porém para que fosse garantida a qualidade do concreto recomenda-se que a porcentagem de substituição não ultrapasse 50%. A literatura aponta que este teor não deve ultrapassar 30%; neste caso, o teor de substituição de 30% apresentou uma queda em alguns ensaios realizados, porém os resultados obtidos não foram extremamente inferiores e a qualidade do concreto convencional pode ser mantida.

Com os resultados obtidos para os ensaios de medição indireta da durabilidade, e também relacionando com os ensaios de determinação das características físicas e mecânicas do concreto, é possível afirmar que o agregado reciclado que apresentou melhor desempenho, tanto para penetração de íons cloreto, quanto ao ataque referente à entrada de gás carbônico (carbonatação) tanto pela migração dos íons cloreto, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção de água, foi o agregado produzido com 100% de concreto (ARCO).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de resíduos de construção civil, tais como agregados reciclados para a mistura de concreto, vem sendo foco de pesquisa ao longo dos anos, por diversos pesquisadores. A cada pesquisa um novo tipo de preocupação, um novo foco, uma nova oportunidade em apresentar este material e impulsionar a ampliação de seu campo de consumo.

No início, a preocupação na utilização dos resíduos de construção civil como agregados reciclados era a respeito da resistência à compressão axial do concreto; após um longo período a pesquisa aprofundou-se nas outras características essenciais para garantir um concreto estrutural de qualidade, tais como o módulo de elasticidade e a capacidade de absorção de água.

Atualmente, o foco desenvolvido pelos pesquisadores é a durabilidade que os concretos utilizando agregado reciclado pode oferecer. O problema do estudo da durabilidade é que a sua determinação não é quantificada através de um ensaio. Para se entender a durabilidade de uma estrutura há a necessidade de entendimento dos materiais utilizados na sua produção, e o que cada característica destes materiais contribui para as características do produto final, o concreto. A determinação da durabilidade de um concreto é realizada através de métodos de ensaios indiretos, que contribuem para a definição do quão durável poderá ser esse material.

Para este trabalho, foram analisadas as características mecânicas e físicas dos concretos, além dos métodos de ensaios indiretos para a determinação da durabilidade, citados na metodologia e nos resultados deste trabalho. Neste contexto, são apresentadas as conclusões respondendo os questionamentos do presente trabalho.

a) Em relação ao tratamento efetuado no agregado cimentício transformando-o em agregado cimentício tratado

Em alguns casos, os traços utilizando o agregado cimentício tratado se sobressaíram aos traços utilizando agregado cimentício, na maioria desses casos, os traços em comparação eram T 20 ARCI e T 20 ARCI Tratado.

Essa melhora nos resultados apresentados pelo concreto T 20 ARCI Tratado quando comparado ao concreto T 20 ARCI pode ser resultado das

condições climáticas no dia da moldagem do T 20 ARCI, que pode ter implicado nestes resultados .

Por isso, para este trabalho, não foi possível observar ganhos ou melhora nas características do concreto após o tratamento e a utilização no agregado reciclado tratado, apesar de a capacidade de absorção de água do agregado ter reduzido com o tratamento.

### **b) Aumento no teor de substituição, de 20% para 30%**

Como observado, em alguns ensaios os comportamentos dos traços com o teor de substituição de 20% foram superiores aos traços com teor de substituição de 30%.

Esta diferença apresentada entre os resultados dos concretos produzidos com teor de substituição de 20% quando comparados aos concretos produzidos com 30% de agregado reciclado não foi significativa o suficiente para que a utilização de 30% de agregado reciclado seja eliminada.

É possível afirmar que apenas para os traços utilizando agregado reciclado de concreto foi possível obter e manter as características do concreto referência para os dois teores de substituição (20% e 30%) para todos os ensaios.

Os demais traços de concreto, utilizando agregado cimentício e agregado cimentício tratado, apresentaram variação em seus resultados, para cada ensaio realizado foi obtido um tipo de comportamento. Por isso, para estes tipos de agregados reciclados o teor de 20% de substituição garantiu de maneira mais adequada as características do concreto convencional.

### **c) Comportamento dos diferentes tipos de agregados reciclados**

Através dos resultados obtidos, observou-se que o comportamento do agregado reciclado de concreto (ARCO) foi superior aos demais agregados reciclados (ARCI e ARCI Tratado). Para algumas características, tais como resistência à compressão axial, a utilização do agregado reciclado de concreto na mistura do concreto garantiu resultados superiores até mesmo quando comparado ao concreto de referência.

Apesar de os traços produzidos com agregado reciclado de concreto (ARCO) terem se sobressaído sobre os demais, isso não indica que a utilização

do agregado cimentício (ARCI) e do agregado cimentício tratado (ARCI Tratado) seja inviável e que estes agregados reciclados não garantam características adequadas para concretos com função estrutural. Quando comparados ao agregado natural e ao agregado reciclado de concreto, os resultados obtidos nos ensaios foram inferiores, porém continuam atendendo às expectativas mínimas de características dos concretos (resistência à compressão axial atingindo os 30 MPa, módulo de elasticidade com valores similares ao concreto convencional, capacidade de absorção de água por imersão não ultrapassando os 7,0% e ensaios de medição indireta com resultados similares ao T REF).

## 8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o desempenho de concretos produzidos com agregados reciclados para diferentes classes de resistências e classes de agressividade;
- Aplicação de adições na produção de concreto com agregado reciclado para avaliar as características do concreto;
- Avaliar o desempenho de concretos utilizando agregados reciclados com teores de substituição mais elevados;
- Avaliar outros tipos de tratamentos com outros materiais, tais como, sílica ativa, metacaulim, entre outros; que podem ser realizados nos agregados reciclados, e o que estes implicariam no produto final;
- Avaliar o comportamento do concreto utilizando agregado reciclado em peças estruturais para avaliação da deformação do concreto armado.

## 9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. Associação Brasileira das empresas de limpeza pública e resíduos especiais. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 2 de Fev. de 2017.

AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 459 – 471, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202-05: Standard test method for electrical indication of concrete ability to resist chloride ion penetration**. Philadelphia, 2005.

AMORIM, A. A. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**. 2010. 74 f. Monografia (Especialista em Construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 724–742, 1993.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: Análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9938: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos**. Rio de Janeiro, 1987. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto forno**. Rio de Janeiro, 1991a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos - elaboração. Rio de Janeiro, 2004a. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004b. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009c. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009d. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 29 p.

AFROUGH SABET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T; Influence of double-hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. **Composite Structures**, v. 181, p. 273-284, 2017.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. 2008. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000105.pdf>>. Acessado em: Set. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - **Plano Nacional De Resíduos Sólidos Preliminar**. 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: 10 de Nov. de 2016.

CASTELLONE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber – Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 145, p. 183-195, 2001.

CENALMOR, M. M.; ESTÉVEZ, D.; GONZALEZ, M. C. Estudio de la durabilidad em hormigones con áridos reciclados procedentes de piezas prefabricadas. In: **1º Encontro Nacional de Patologia e Reabilitação de Edifícios -PATORREB**, 1, 2015, Porto, Portugal, 2015.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concreto com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.

DE SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K., 2004. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, p. 591-596, 2004.

DODDS, W.; GOODIER, C.; CHRISTODOULOU, C.; AUSTIN, S.; DUNNE, D. Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 183-195, 2017.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao Sistema aço-concreto com ou sem pozolana**. 2006. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 416-424, 2016.

EUROPEAN COMMISSION (DG ENV). **Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste**. Bio Intelligence Service, Final Report Task 2, 2011. Disponível em:  
<[http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011\\_CDW\\_Report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2016.

FAELLA, C.; LIMA, C.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; REALFONZO, R. Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: an experimental study. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 85-96, 2016.

FERREIRA, T. N. S. **Propriedades Mecânicas e durabilidade do concreto branco com adições pozolânicas**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

FRANÇA, C. B. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

GANDÍA-ROMERO, J. M.; CAMPOS, I.; VALCUENDE, M.; GARCÍA-BREIJO, E.; MARCOS, M. D.; PAYÁ, J.; SOTO, J. Potentiometric thick-film sensor for measuring the pH of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 66-76, 2016.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 2015.

GONÇALVES, P.; de BRITO, J. Recycled aggregate concrete (RAC) - Comparative Analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, p. 339 – 346, 2009.

HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1992.

HOMAN, L., ABABNEH, A. N., XI, Y. The effect of moisture transport on chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1189 – 1195, 2016.

HUSSAIN, S.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1543 – 1555, 1995.

IFFAT, S.; EMON, M. A. B.; AHMAD, S. I. An experiment on durability test (RCPT) of concrete according to ASTM Standard Method Using Low-Cost Equipments. **Advanced Materials Research**, v. 974, p. 335 – 340, 2014.

JAMES INSTRUMENTS. *Poroscope™ Determines Air and Water Permeability in Concrete Both At and Below the Surface*. Disponível em <<http://www.ndtjames.com/Poroscope-p/c-p.htm>>. Acessado em: Abril, 2017.

JOHN, V. M. AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção. Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares – Secretária do Estado do Meio Ambiente**. 2010.

KIM, M.; YANG, E.; YI, S. Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 239 – 245, Nov. 2013.

KUBISSA, W.; SIMON, T.; JASKULSKI, R.; REITERMAN, P.; SUPERA, M. Ecological high performance concrete. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 595 – 603, 2017.

KURAD, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485 – 502, 2017.

ESPECIFICAÇÃO LNEC E 471 – 2009. Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil**. Portugal. 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 2 p.

LIMA, M. G. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON. Volume 1. p.733-771/volume 1. 2011.

LLATAS, C. A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. **Waste Management**, v. 31, p. 1261 – 1276, 2011.

MCGUINNIS, M. J.; DAVIS, M.; ROSA, A.; WELDON, B. D.; KURAMA, Y. C. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 258 – 269, 2017.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON. p. 773-808/volume 1. 2011.

MEDEIROS, M. H. F.; BORBA, A. Y.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. R. L. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 475-481, 2012.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão das armaduras devido a penetração de íons cloreto**. 2011. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura de Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

MEHTA P. M.; MONTEIRO P. M. J. **Concreto: Estrutura, Propriedades e materiais**. São Paulo: Editora PINI, 2008.

MENDES, E. L. S. **Caracterização e composição de agregados reciclados para obtenção de concreto autoadensável leve reciclado com fins**

**estruturais**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2016.

MEYER, C. **Concrete Materials and Sustainable Development in the United States**. Columbia University, 2005. Disponível em:

<<http://www.columbia.edu/cu/civileng/meyer/publications/publications/83%20Concrete%20Materials%20and%20Sustainable%20Development.pdf>>. Acesso em: Julho de 2017.

MIRANDA, R. J. N. **Betão com agregados reciclados. Estado da Arte e Análise na Região Autônoma da Madeira**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Madeira – Funchal, Portugal, 2014.

MOH, Y.; MANAF, L. A. Solid waste management transformation and future challenges of source separation and recycling practice in Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 1-14, 2016.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

NGUYEN, D. G.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 137-150, 2017.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 315-318, 2005.

OMRANE, M.; KENAI, S.; KADRI, E.; AITU-MOKHTAR, A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 415-430, 2017.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: Ed. Jean-Pierre Olivvier e Angélique Vichot, 2014.

OZALP, F.; YILMAZ, H. D.; KARA, M.; SAHIN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 17-23, 2016.

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 294-309, 2017.

PELISSARI, V.; MIRANDA, R. J. N. **Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba, 2016.

PEREA M.; ALVARADO Y. A. Propriedades mecânicas em concretos fabricados con agregados gruesos reciclados tratados com lechadas. In: **Congresso Latino-Americano de Patologia de Construcción**, 2015, Portugal.

PEREIRA, V. M. **Permeabilidade ao ar do concreto**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2011.

POULIKAKOS, L. D.; PAPADASKALOPOULOU, C.; HOFKO, B.; GSCHOSSER, F.; FALCHETTO, A. C.; BUENO, M.; ARRAIGADA, M.; SOUSA, J.; RUIZ, R.; PETIT, C.; LOIZIDOU, N.; PARTL, M. N. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 32 – 44, 2016.

REAL, L. V.; OLIVEIRA, D. R. B.; MEDEIROS, M. H. F. Método colorimétrico por aspersion de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista ALCONPAT**, México, v. 5, Número 2, p. 149 – 159, Maio, 2015.

RIDING, K. A.; POOLE, J. L.; SCHINDLER, A. K.; JUENGER, M. C. G.; FOLLIARD, K. J. Simplified concrete resistivity and rapid chloride permeability test method. **ACI Materials Journal**, Estados Unidos, v. 105-M45, p. 390-394, 2008.

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. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SÃO PAULO. Secretária do Meio Ambiente. **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2015. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acessado em: Nov. 2017.

SINDUSCON. Sindicato da Construção. **Gestão Ambiental de resíduos da construção civil –Avanços institucionais e melhorias técnicas**. São Paulo, 2015. Disponível em: < <https://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2015/09/MANUAL-DE-RESÍDUOS-2015.pdf>> . Acessado em: Jul. 2017.

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) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, R. V.; DE BRITO J. 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.; DE BRITO J. Use of recycled aggregates from construction and demolition wastes in the production of structural concrete. In: **EURO ELECS 2015**, Portugal, 2015.

SILVA, R. S.; ANDRADE, J. J. O. 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.

SOTTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade.** 2014. 58 f. Monografia (Especialista em Patologias das Construções) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

STAFFORD, F. N.; DIAS A. C.; ARROJA, L.; LABRINCHA J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 159-165, 2016.

SUCIC, A.; LOFTY, A. Effect of new paste volume on performance of structural concrete using coarse and granular recycled concrete aggregate of controlled quality. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 119-128, 2016.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: A literature review. Department of Civil Engineering.** University of Toronto, Ontario, Canadá. s.d. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/237321599\\_Testing\\_the\\_Chloride\\_Penetration\\_Resistance\\_of\\_Concrete\\_A\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/237321599_Testing_the_Chloride_Penetration_Resistance_of_Concrete_A_Literature_Review)>. Acessado em: dez. 2016.

Technical Bulletin TB 0100 (Concrete), “**Understanding AASHTO T277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test**”. 2006. Disponível em: <<https://gcpat.com/construction/en-ca/Documents/TB-0100CPT.pdf>>. Acesso em: 15 março 2017.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

VALLS, S.; VÁSQUEZ, E. Accelerated carbonation of sewage sludge-cement-sand mortars and its environmental impact. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1271 – 1276, 2001.

VERAS, L. M. **Estudo das propriedades do concreto com diferentes proporções de agregados de resíduos de construção civil com e sem**

**saturação prévia.** 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 84 p. 214 - 221, 2017.

ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 516 – 526, 2016.

WANG, H.; DAI, J.; SUN, X.; ZHANG, X. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 216 – 225, 2016.

WIMALA, M.; FUJIKI, A.; KAWAI, K. Environmental impact of waste concrete treatment in precast concrete production. **Proceeding of the Japan Concrete Institute**, v. 33, p. 1902–1906, 2011.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). “**The Cement Sustainability Initiative**”. 2009. Disponível em:

<<https://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-Summary.pdf>>.

Acesso em: 2 fev. 2017.

WU, H.; DUAN, H.; ZHENG, L.; WANG, J.; NIU, Y.; ZHANG, G. Demolition waste generation and recycling potentials in a rapidly developing flagship megacity of South China: Prospective scenarios and implications.

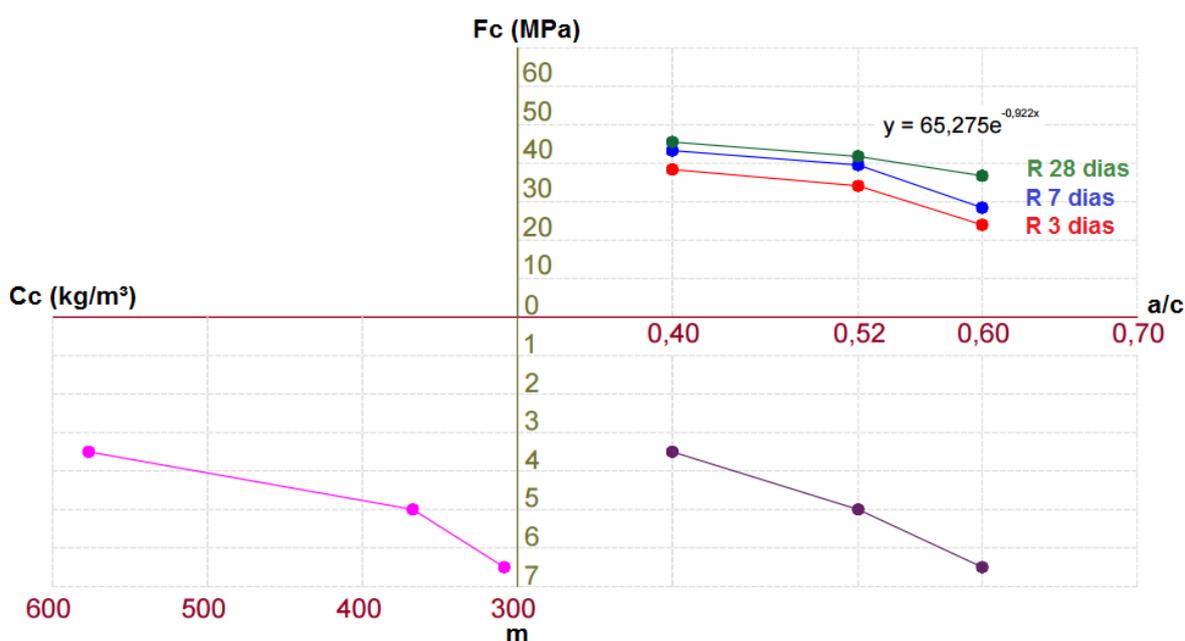
**Construction and Building Materials**, v. 113 p. 1007-1016, 2016.

## APÊNDICE A

### Estudo de Dosagem

A Figura A1 apresenta o ábaco resultante do processo de dosagem, que apresenta os gráficos de resistência versus relação a/c; relação a/c versus massa de agregado (m); massa de agregado (m) versus consumo de cimento. A partir dele foi definido o traço referência C30.

**Figura A1** - Gráficos para determinação do traço referência.



Fonte: da autora, 2016.

Os gráficos apresentados foram obtidos através de três traços pilotos, denominados traço rico, médio e pobre, com relação água e cimento de 0,40; 0,52; 0,60, respectivamente. Após a produção dos concretos, os corpos de prova foram moldados e ensaiados aos 3 dias, 7 dias e 28 dias, para que fosse possível a construção do gráfico do quadrante 1 da Figura A1.

O valor de  $m$ , que é a soma dos agregados miúdo e graúdo utilizados, apresentado no quadrante 2 da Figura 73 foi determinado através da equação apontada por Helene e Terzian (1992), apresentada na Equação 7.

$$m = a + p$$

(7)

Onde:

a = a relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

p = a relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

m = a relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg.

O quadrante 3 é representado pelo consumo de cimento em kg/m<sup>3</sup> por traço, sendo calculado através da Equação 8 (HELENE; TERZIAN, 1992).

$$C_c = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad (8)$$

Onde:

C<sub>c</sub> = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m<sup>3</sup>;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

a/c = relação a/c.

A partir do ábaco apresentado na Figura 15 foi possível obter o traço de concreto para a resistência de 30 MPa utilizado neste trabalho. A partir da definição da resistência de 30 MPa aos 28 dias obteve-se, no quadrante 1, a relação a/c de 0,6 e, no quadrante dois, a partir da relação a/c é obtido o valor de m (relação de agregado graúdo e miúdo) que resultou em m=6,5, e através do m foi possível obter o consumo de cimento para o traço de concreto, que foi de 308,5 kg/m<sup>3</sup>.