



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM**  
**AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CERÂMICA VERMELHA**

**RUAN FABRÍCIO GONÇALVES MORAES**

Belém

2016

**RUAN FABRÍCIO GONÇALVES MORAES**

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, pelo Instituto Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Linha de pesquisa: Estruturas e Construção civil, para obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Belém

2016



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus Pais e irmãos,  
que sempre me apoiaram e incentivaram em  
todas as etapas da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente e com todo meu coração a Deus, pela Graça de me permitir terminar este trabalho. Para Ti são todas as coisas.

Ao meu professor e orientador Paulo Sérgio, exemplo de profissional e principalmente como pessoa. Expresso meu profundo agradecimento por todo apoio, seriedade, exigência, ensino transmitido, amizade, e por sempre acreditar em mim e na minha capacidade. Muito obrigado por tudo professor.

Aos professores, Isaura Paes, Alcebíades Macedo, Luciana Cordeiro, Cláudio Blanco, Dênio Ramam, por todo ensino, auxílio e apoio dado durante o curso.

À CAPES pelo fomento da bolsa de estudo tão ambicionada pelos alunos de pós-graduação.

À VEDACIT impermeabilizantes pelo fornecimento de produtos utilizados neste trabalho.

Ao Joel, Maneca e Arnaldo pela organização e ajuda nos ensaios de laboratório.

Ao Jesus Nazareno do laboratório de engenharia mecânica, pela grande ajuda no ensaio de carbonatação.

Ao Max e Luciana pela ajuda e conselhos durante os experimentos.

Aos meus amigos feitos durante o curso de mestrado, Marcos Anderson e Peterson Vaz.

Aos meus pais, pela paciência, amor incondicional e por todo o suporte e sacrifício ao longo de toda minha vida.

Aos meus irmãos, e melhores amigos Pablo, Iran, Suzan e Pedro por suportarem tudo comigo.

Minha cunhada Lívia pelo incentivo e minha sobrinha Ana Rebeca que mesmo com apenas 10 meses foi uma grande motivação para mim.

A minha amada namorada Kariny Coelho, por todo apoio, amizade, carinho, paciência, incentivo e motivação durante a finalização deste trabalho.

À todos que direta ou indiretamente me ajudaram até aqui. Muito obrigado!

Uma vez mais, muito obrigado a todos!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 . CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	15
1.2. JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 OBJETIVO.....	21
1.3.1 Objetivo Geral .....	21
1.3.2 Objetivos Específicos .....	21
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA .....	22
<b>2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC .....</b>	<b>23</b>
2.1 Histórico.....	23
2.2. Definição.....	25
2.3. A GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E GERENCIAMENTO DOS RCD .....	27
2.4. OS RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA .....	35
2.4.1. Cerâmica .....	35
2.4.1.1. Classificação da Cerâmica.....	35
2.4.1.2. Argila como Matéria Prima .....	35
2.4.1.3. A Utilização na Construção Civil .....	37
2.4.1.4. A Reciclagem da Cerâmica Vermelha como agregado.....	38
<b>3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS. ....</b>	<b>39</b>
3.1. Características do Agregado Reciclado.....	39
3.1.1. Porosidade e absorção de água .....	40
3.1.2. Massa Unitária, Massa Específica, Granulometria.....	41
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO..	43
3.2.1. Comportamento do Concreto com Agregado Reciclado no Estado Fresco –Trabalhabilidade .....	43

3.2.2. Comportamento no Estado Endurecido.....	44
3.2.2.1. Resistência à Compressão Axial.....	44
3.2.2.2. Durabilidade .....	45
3.2.2.3. Transporte de massa e agentes agressivos no concreto. ....	46
3.2.2.3.1. Permeabilidade .....	47
3.2.2.3.2. Absorção por Capilaridade .....	48
3.2.2.3.3. Difusão.....	50
3.2.2.4. Análise de Mecanismos Combinados .....	52
3.2.2.4.1. Resistência Elétrica .....	52
3.2.2.4.2. Carbonatação .....	56
3.2.2.4.3. Penetração de Íons Cloreto .....	60
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>64</b>
4.1. PLANEJAMENTOS DOS ENSAIOS .....	64
4.2. AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	66
4.3. DOSAGEM DOS CONCRETOS .....	73
4.4. ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	75
4.4.1. Absorção por Capilaridade .....	75
4.4.2. Penetração acelerada de Íons cloreto (ASTM 1202, 2007).....	75
4.4.3. Resistividade Elétrica .....	77
4.4.4. Carbonatação acelerada do concreto.....	79
<b>4.5. PRODUÇÃO DAS MISTURAS E CORPOS DE PROVA. ....</b>	<b>82</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>84</b>
5.1. CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	84
5.1.1. Abatimento .....	84
5.2. CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	85
5.2.1. Resistência à Compressão Axial .....	85
5.2.2. Absorção por Capilaridade .....	92
5.2.2.1. Influência da utilização do AMC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na absorção por capilaridade. ....	95
5.2.3. Carbonatação acelerada .....	98
5.2.3.1. Influência das variáveis relação a/c, idade e teor de AMRC, na carbonatação do concreto.....	101

5.2.4. Resistividade Elétrica .....	107
5.2.4.1. Influência do teor de AMRC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na resistividade elétrica. ....	111
5.2.5. Penetração acelerada de íons cloreto .....	112
5.2.5.1. Influência do teor de AMC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na penetração de íons cloreto. ....	114
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>120</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	125
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>128</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Resíduo de construção e demolição sem destino nas ruas de Belém/PA. ....	18
Figura 2- Composição do RCD na cidade de São Carlos/SP (Pinto, 1986).....	29
Figura 3- Processo de difusão de cloretos (MEDEIROS, M. H. F. de, 2008).....	51
Figura 4 - Resistividade elétrica em pastas com diferentes tipos de cimentos, a temperatura de 22°C e umidade relativa de 100% (HANSSON E HANSSON, 1983).....	55
Figura 5 - Resistividade elétrica em função do consumo de cimento/m <sup>3</sup> de concreto (WHITING e NAGI, 2003).....	56
Figura 6 - Processo de carbonatação em diferentes condições (A) 200 C e 65% de umidade relativa, (B) ambiente externo protegido por telhado, (C) ambiente externo sem proteção na Alemanha. Estes valores são médias de concretos com relação a/c de 0,40, 0,60 e 0,80 com cura úmida por 7 dias (NEVILLE, 2002). .	58
Figura 7 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição para três faixas de resistência dos concretos produzidos (LEVY, 2001).....	60
Figura 8 - Curva granulométrica da brita. ....	68
Figura 9 - Máquina de abrasão Los Angeles. ....	69
Figura 10- Curva granulométrica da areia e do AMC.....	71
Figura 11 – Gráfico de absorção do agregado miúdo reciclado cerâmico em relação ao tempo. ....	72
Figura 12 - Gráfico referência de dosagem IPT/USP.....	74
Figura 13 - Princípio de funcionamento utilizando a técnica dos 4 eletrodos (SILVA, 2012). ....	78
Figura 14 - Amostra de corpo de prova carbonatada após aspersão de fenolftaleína. ....	81
Figura 15 - Seleção da área a ser estudada.....	82
Figura 16- Resistência à compressão aos 28 dias para todas as misturas. ....	88
Figura 17– Resistência à compressão para 25% de substituição em 28 dias. ...	89
Figura 18 – Resistência à compressão para 12,5% de substituição em 28 dias.	89
Figura 19 – Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,65. ....	90

Figura 20 - Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,55. ....	91
Figura 21 - Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,45. ....	92
Figura 22–Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,45.....	100
Figura 23 - Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,55.....	100
Figura 24 - Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,65.....	100
Figura 25 - $KCO_2$ em função do tipo de mistura para as relações a/c. ....	102
Figura 26 - $KCO_2$ em função da relação a/c para cada tipo de mistura. ....	103
Figura 27– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 3 dias de exposição.....	105
Figura 28– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 7 dias de exposição.....	105
Figura 29– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 28 dias de exposição.....	105
Figura 30 - Valores de resistividade elétrica aparente em função da relação a/c (a) 25% AMRC aos 28 dias, (b) 25% AMRC aos 63 dias, (c) 12,5% AMRC aos 28 dias, (d) 12,5% AMRC aos 63 dias. ....	110
Figura 31- Influência da variável “idade” na penetração de cloretos.....	115
Figura 32- Influência da variável “taxa de pré-molhagem” na penetração de cloretos. ....	115
Figura 33- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 63 dias nas misturas com 25% de substituição. ....	116
Figura 34- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 63 dias nas misturas com 12,5% de substituição. ....	117
Figura 35- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 91 dias nas misturas com 25% de substituição. ....	118
Figura 36- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 91 dias nas misturas com 12,5% de substituição. ....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de RCD coletado no Brasil, ABRELPE (2013). .....	17
Tabela 2 - Comparação da composição de RCC (Fonte: LOVATO, 2007).....	30
Tabela 3 – Sugestão de uso para concretos de agregados reciclados.....	30
Tabela 4- Normas Brasileiras ABNT para Resíduos.....	31
Tabela 5 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por existência e tipo de processamento de resíduos, segundo as grandes regiões e unidades da federação – 2008. ....	33
Tabela 6 - Classificação de concretos em relação a profundidade de carbonatação (Levy, 2001). ....	59
Tabela 7- Limite das normas para teor máximo de cloreto em concreto. ....	62
Tabela 8– Características físicas e mecânicas do CP V ARI.....	66
Tabela 9– Características químicas do CP V ARI.....	67
Tabela 10- Características do agregado miúdo .....	67
Tabela 11 - Características do agregado graúdo.....	68
Tabela 12 - Características do agregado miúdo reciclado.....	70
Tabela 13- Quantidade de material utilizado por traço. ....	74
Tabela 14 - Risco de penetração aos íons cloreto em relação a carga passante (ASTM C1202).....	77
Tabela 15 - Critérios de avaliação do risco de corrosão propostos pelo CEB 192 (1998). ....	79
Tabela 16 - Abatimento em milímetros para cada mistura.....	84
Tabela 17- Valores de resistência à compressão nas idades de 28 e 63 dias. ..	86
Tabela 18- Valores de absorção por capilaridade em g/cm <sup>2</sup> nas idades de 28 e 63 dias. ....	93
Tabela 19- Relação proporcional dos valores unitários de absorção por capilaridade.....	93
Tabela 20 - Tabela ANOVA para as variáveis: teor de substituição, idade, relação a/c e taxa de pré-molhagem.....	95
Tabela 21- Profundidades de carbonatação para os diferentes períodos de exposição e o coeficiente de carbonatação das misturas e relação água/cimento. ....	99

Tabela 22- Tabela de equações e $r^2$ para retas de regressão linear para todas as misturas. ....	101
Tabela 23- Análise de variância ANOVA para as variáveis no ensaio de carbonatação. ....	101
Tabela 24- valores médios dos resultados obtidos nos corpos de prova no ensaio de resistividade elétrica em Ohm.m. ....	107
Tabela 25- Valores de resistividade em proporção unitária. ....	108
Tabela 26 - ANOVA das variáveis estudadas na resistividade elétrica em concretos com AMC. ....	111
Tabela 27- Valores das cargas passantes em Coulombs (q) para todas as misturas. ....	112
Tabela 28- Proporção das cargas passantes nas misturas para penetração de cloretos. ....	113
Tabela 29- ANOVA das variáveis analisadas na penetração de cloretos das misturas com AMC. ....	114

## RESUMO

A geração de resíduos de construção civil (RCC), no Brasil e no mundo são de grandes proporções. Porém, o seu reaproveitamento não se dá na mesma medida em que são gerados pela construção civil, soma-se a isso, a necessidade de encontrar soluções para o depósito em aterros destes resíduos, a insustentabilidade do consumo de recursos naturais, onde jazidas já apresentam sinais de escassez de agregados. Logo, a utilização da cerâmica vermelha como agregado para concreto traz consigo a consciência de cooperação ambiental e sustentabilidade. Neste cenário, onde a bibliografia ainda se encontra escassa com relação às propriedades de durabilidade do concreto com este tipo de agregado, este trabalho teve como objetivo melhorar e difundir o conhecimento a respeito deste resíduo na construção civil. Para isso, foram produzidas misturas com relação água/cimento de 0.45; 0.55 e 0.65, onde, o agregado miúdo natural foi substituído pelo agregado miúdo cerâmico em 0%, 12,5% e 25%, e cada porcentagem foi submetida às taxas de pré-molhagem de 40%, 60% e 80%. Posteriormente, foi avaliada a durabilidade dos concretos produzidos com agregado miúdo cerâmico (AMC), através de ensaios de absorção por capilaridade, carbonatação, resistividade elétrica e penetração de íons cloretos. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o abatimento foi satisfatório na maioria das misturas, e em relação à durabilidade, de modo geral, todas as misturas com agregado reciclado cerâmico apresentaram maior durabilidade que as de referência, principalmente nas misturas com 25% AMC. As taxas de pré-molhagem mostraram-se eficientes na maioria das misturas, mostrando satisfatória influência nos resultados finais em todos os ensaios realizados. Portanto, conseguiu-se mostrar grande viabilidade da utilização deste resíduo no concreto, melhorando o seu desempenho.

*Palavras-chave: Concreto, Agregado cerâmico, Resíduo.*

## **ABSTRACT**

The generation of waste from civil construction (WCC) in Brazil and in the world are of great proportions. However, its reuse does not occur in the same proportions that are generated by construction, is added to this, the need to find solutions for the landfilling of these wastes, unsustainable consumption of natural resources, where deposits already present signals aggregate shortage. Therefore, the use of red ceramic as recycled aggregate, reduces costs for the production of concrete, brings awareness of environmental cooperation and sustainability. In this scenario, the literature is still scarce in relation to the concrete durability properties for this kind of aggregate. Thus, this study aimed to improve and disseminate knowledge about these waste in construction. To this end, mixtures were made with water / cement ratio of 0.45; 0.55 and 0.65, where the aggregate has been replaced by natural fine ceramic aggregate in 0%, 12.5% and 25%, each percentage was subjected to pre-wetting rate of 40%, 60% and 80%. Subsequently, the durability of concrete produced with fine ceramic aggregate (FCA) was evaluated through capillary absorption, carbonation, electrical resistivity and chloride ion penetration. With the results obtained it can be concluded that the slump test was satisfactory in most mixtures, with respect to durability, in general, all mixtures with ceramic recycled aggregate had higher durability than the reference, especially in mixtures with 25% AMC. Pre-wetting rates were effective in most mixtures, showing satisfactory influence on the final results in all tests. So it managed to show great feasibility of using this waste in concrete, improving their performance.

*Key-words: Concrete, Waste, Ceramic aggregate*

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Há alguns anos a natureza e seus recursos eram vistos apenas como fonte de matéria prima para o desenvolvimento da sociedade como um todo. Neste contexto, tem-se segundo TAYRA E RIBEIRO (2006), que os recursos naturais estão sendo usados acima da capacidade de carga que o planeta suporta, denominam de déficit ecológico, o que significa que os recursos naturais do planeta estão sendo consumidos em torno de 40% acima de sua oferta. Os mesmos autores ainda afirmam que o dado apresentado pode variar de acordo com o tamanho da população, média de consumo por pessoa, a intensidade de uso dos recursos e a capacidade do homem em tratar os resíduos e dejetos durante o processo. Esta capacidade de consumo também é colocada por (SJOSTROM 2006), o qual afirma que, a construção civil consome em média 35% da matéria prima consumida pela sociedade moderna.

Por outro lado, ocorre hoje no mundo um grande problema de cunho ambiental que é a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), onde um considerável percentual destes resíduos é oriundo das atividades que envolvem os processos de transformação do setor da construção civil. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), a porcentagem de resíduos gerados por este setor, denominado Resíduos de Construção e Demolição (RCD) pode chegar a 57% do total de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Estes resíduos acabam por ser dispostos em locais públicos trazendo uma série de anormalidades para a sociedade e para o meio ambiente como: contaminação de rios e também proporciona proliferação de doenças pelo acúmulo de material exposto, entre outros (CHANDRA, 2004).

Tendo em vista estes dados, é imprescindível em nossos dias repensar em todas as vertentes em que atua o setor da construção civil no desenvolvimento da sociedade moderna, principalmente, no que concerne aos métodos de produção e o grau de aproveitamento e desperdício que há de recursos naturais. Toda esta preocupação com a sustentabilidade foi originada após a grande conscientização que a indústria da construção civil absorveu, de

que é uma indústria que consome de forma quantitativamente elevada tais recursos.

Neste contexto, tem-se que, um dos principais motivos pelo elevado desperdício, se dá em grande parte pela falta de gestão adequada nesse setor, principalmente, na questão que se refere aos modos de produção atuais praticados na indústria da construção civil mundial, sendo este, na maioria das vezes, o principal agente causador do mal aproveitamento dos materiais advindos do extrativismo de recursos naturais. Desta forma, o fato desses materiais serem advindos de fontes não renováveis, enfatiza ainda mais a necessidade e a força com que o desenvolvimento sustentável tem se estabelecido no contexto de proteção do meio ambiente, ao mesmo tempo em que, também valoriza o desenvolvimento da sociedade atual.

No Brasil, de acordo com a Resolução nº307/2002 CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), na construção civil a geração de resíduos se dá através do mal aproveitamento de material destinados às obras, construções demolidas, reformas, reparos entre outros, sendo a nomenclatura utilizada na resolução de Resíduos de Construção Civil (RCC). Logo, são necessárias ações mais rigorosas do governo junto às instituições privadas deste setor, para que, as leis estabelecidas sejam aproveitadas de forma substancial. Segundo SCHALCH (2002), a melhor forma de reduzir e até mesmo debelar a geração de resíduos seria a sua minimização nas fontes geradoras de resíduos. A segunda alternativa seria a reciclagem ou o reuso destes resíduos, caso as técnicas de redução na fonte não forem viáveis para aplicação.

Nota-se hoje, a visível preocupação que os governos apresentam em torno da sustentabilidade, isso é visível à medida que, as leis relacionadas a este assunto são cada vez mais incisivas. Além disso, estudos profundos acerca dos resíduos tornam-se cada vez mais necessários para saber como aplicá-los, quais as restrições de seu uso na construção civil e então torná-los viáveis para uso na sociedade.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2008), o setor de reciclagem no Brasil movimenta cerca de R\$ 12

bilhões por ano, ainda assim o país perde cerca de R\$ 8 bilhões anuais por deixar de reciclar resíduos que são encaminhados para aterros e lixões. Segundo dados do IBGE (2013), o lixo produzido no país por dia chegou a 209 mil toneladas de resíduos sólidos, sendo que cerca de 60% são destinados a aterros sanitários, a mesma quantidade encontrada na pesquisa do ano anterior, o restante em torno de 41,7% continua sendo jogado em aterros e lixões. Em dados anteriores, 69% do lixo no Brasil estariam tendo um destino adequado em aterros ao invés dos lixões. Na verdade, aterros e lixões pouco se diferenciam entre si, uma vez que ambos não apresentam adequações necessárias para a correta proteção contra os prejuízos e degradações do meio ambiente. Além disso, dos mais de 5000 municípios que o Brasil possui, mais de 3000 não possuem condições de fazer aterros sanitários.

Dados da ABRELPE (2013), mostram que a quantidade de resíduos no Brasil continua crescente. Através do panorama 2013 (tabela 01) nota-se que a geração de RCD (Resíduos de Construção e Demolição), aumentou de 112 mil para 117 mil de 2012 para 2013, fato este que requer uma solução adequada e prática para estes resíduos.

Tabela 1- Quantidade de RCD coletado no Brasil, ABRELPE (2013).

REGIÃO	2012	2013		
	RCD Coletado (t/dia)/ Índice (Kg/hab./dia)	População Total (hab.)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/hab./dia)
BRASIL	112.248 / 0,579	201.062.789	117.435	0,584

Segundo o panorama da ABRELPE (2013), é preocupante também a geração de RCD, que cresceu em torno de 4,6% de 2012 a 2013, chegando a mais de 42 milhões de toneladas ao final de 2013.

Na cidade de São Paulo, construções e reformas geram quase 17 mil toneladas diárias de entulho ou resíduos de construção e demolição (RCD), volume este que significa o dobro do que é descartado no lixo domiciliar. Cerca de 95% desse volume, vem de obras privadas. Desse total, 85% são transportados por empresas particulares, e o restante 15% acaba virando

problema de limpeza pública: é despejado em áreas públicas ou terrenos por transportadores autônomos (FOLHA DE SÃO PAULO, 2005).

Na cidade de Belém, no ano de 1997, foram produzidos, segundo PEREIRA E TAVARES (1997), uma quantidade de 1800 toneladas de lixo para uma população de 1.142.258 habitantes. Ainda segundo os mesmos autores, o governo local tinha a capacidade de coletar menos de 70% de todo lixo produzido, uma vez que este é quase todo lançado no lixão do Aurá. Em 2011, segundo a Secretária Municipal de Saneamento (Sesan), em Belém foi produzido 1,7 mil metros cúbicos por dia. Ou seja, 14 anos depois, são produzidas mais de 620 mil toneladas de lixo por ano. Desta forma, é necessário adotar um novo modelo de gestão moderno e sustentável, baseado em princípios básicos e sistêmicos da minimização, descentralização, segregação da reciclagem e compostagem. A seguir na figura 01, é mostrada a situação de depósito de RCD nas ruas da cidade de Belém no Pará.



Figura 1- Resíduo de construção e demolição sem destino nas ruas de Belém/PA.

Hoje a falta de tratamento e gestão adequada dos resíduos gerados pela construção civil ainda é existente pela falta de alternativas mais acessíveis em termos financeiros, já que, os tratamentos e a deposição para estes resíduos existente atualmente, requerem gastos elevados. Há ainda a falta de políticas de preservação ambiental, o que por sua vez, acaba provocando cada vez mais o estudo para o desenvolvimento da viabilidade de novas soluções, visando o desenvolvimento sustentável para minimizar ao máximo os

problemas gerados pelo RCC. Segundo CABRAL (2007) é necessário fazer um esforço para que estes resíduos sejam minimizados na fonte, em parceria com as empresas que constroem.

Dentro deste contexto, existe também a questão ambiental que devido às grandes quantidades de entulho geradas pela indústria da construção civil, alerta para o imperativo de se incorporarem, nas empresas, os preceitos recomendados pela NM-ISO14001 (ABNT, 2007). A incorporação dessas normas, além de representar uma vantagem competitiva, impulsiona o desenvolvimento de tecnologias alternativas e a racionalização da utilização de materiais, evitando-se o desperdício (ÂNGULO, 1998; 2000; 2005).

A indústria da construção civil, apesar de ser uma das principais geradoras de resíduos, mostra-se também como a maior habilitada para o processo de reciclagem e reaproveitamento de resíduos. Segundo LEITE (2001), a reutilização dos resíduos de construção e demolição, tem sido feita em grande proporção nas obras de pavimentação. Todavia, muitos pesquisadores (CABRAL, 2007; LEITE, 2001; BRAVO et al., 2015) têm buscado cada vez mais direcionar este material como matéria prima para novos concretos.

Uma das razões para esta afirmação se dá pela maior facilidade de incorporação destes nos materiais de construção. Como exemplo de reciclagem e reaproveitamento de resíduos na construção civil, temos: sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante, metacaulim entre outros. Tais resíduos são reaproveitados em larga escala na produção de concreto, fornecendo como resultado, concreto com resistência, desempenho e durabilidade elevada. Estes são alguns dos principais resíduos reutilizados na construção civil o que ratifica a capacidade de incorporação de resíduos na fabricação de concreto.

Ao mesmo tempo, é preciso atentar para o fato de que, existe uma grande demanda de agregados naturais para produção de concreto e argamassas. Sendo assim, já é possível prever escassez da oferta de agregados naturais em algumas regiões do país.

Sendo assim, a solução para a redução dos impactos ambientais seria a implantação de uma reciclagem sistemática dos resíduos gerados pela construção civil em todas as áreas da sociedade, tendo em vista a grande

potencialidade de reaproveitamento dos RCC. Para isso, é fundamental que sejam gerados cada vez mais estudos sobre a incorporação de resíduos de construção e demolição em argamassas e concreto, pois, só assim se poderá comprovar os benefícios do reaproveitamento destes resíduos e criar um arcabouço de argumentos técnicos para justificar sua aplicação na construção civil.

Em função desta situação, o desenvolvimento de estudos tecnológicos focados ao processo de reciclagem de RCC tem considerável crescimento e relevância. Apesar de já terem sido feitos vários trabalhos e estudos a respeito da incorporação de agregados reciclados em concretos, os feitos apenas com agregados de origem cerâmica ainda são escassos.

Desta forma, com este estudo pretende-se contribuir para o melhor entendimento das propriedades do concreto produzido com agregado miúdo cerâmico (AMC), principalmente em relação à sua durabilidade, e perceber quais são suas limitações para esta finalidade. Sendo este trabalho relevante para colaborar no estudo de viabilização técnica da utilização de RCC como agregado miúdo.

## 1.3 OBJETIVO

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi produzir concretos experimentais utilizando agregados miúdos originados da reciclagem de RCC de natureza cerâmica, com diferentes taxas de pré-molhagem de água (PM). Então, foi avaliada a durabilidade destes concretos através dos ensaios de absorção de água por capilaridade, carbonatação acelerada, penetração de íons cloretos e resistividade elétrica.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos secundários, citam-se:

- ✓ Avaliar a influência do agregado miúdo reciclado no concreto quanto a trabalhabilidade e resistência à compressão axial.
- ✓ Analisar os teores de substituição de 12,5% e 25% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, visando definir qual o melhor desempenho.
- ✓ Avaliar a influência das taxas de pré-molhagem de água para os agregados reciclados em relação às propriedades mecânicas e na durabilidade.
- ✓ Avaliar a influência das variáveis relação água/cimento, idade e taxa de saturação do agregado miúdo reciclado nos concretos experimentais.
- ✓ Fornecer ao meio técnico alternativa para o aproveitamento do RCC.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA

A distribuição da dissertação se dá da seguinte forma:

- Capítulo 1: é constituído de introdução, justificativa, objetivos principais e secundários e estruturação do trabalho.
- Capítulo 2: é exposto um histórico sobre a utilização do RCD no decorrer dos anos, sua aplicação e formas de gerenciamento deste material.
- Capítulo 3: são mostradas as principais consequências do emprego dos agregados de RCC nos concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sob o aspecto de durabilidade.
- Capítulo 4: são apresentados todos os procedimentos para o desenvolvimento do programa experimental: metodologia, caracterização dos materiais, método de dosagem e os ensaios de durabilidade definidos neste trabalho.
- Capítulo 5: são apresentados os resultados dos ensaios executados e a discussão do trabalho, onde foi avaliado as propriedades das misturas ensaiadas. Utilizou-se também uma análise estatística (ANOVA) para avaliar a influência das variáveis nos resultados obtidos.
- Capítulo 6: foram feitas as conclusões do trabalho, abordando o alcance dos objetivos estabelecidos, bem como as considerações finais acerca dos resultados dos ensaios realizados.

## **2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC**

### **2.1 Histórico**

Sabe-se que a construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento na humanidade, e que, através desta atividade foram geradas quantidades consideráveis de resíduos minerais. ÂNGULO (1998), relata que os primeiros registros de reutilização de resíduos minerais da construção civil na produção de novas obras foram obtidos do Império Romano. Porém, o primeiro registro da reutilização de resíduos em grandes proporções só foi visto após a segunda guerra mundial, quando da reconstrução das cidades europeias destruídas pela guerra. No contexto atual, há um grande desafio a respeito da gestão dos resíduos gerados pela construção civil, que demanda mudanças de grande importância em relação a conscientização da diminuição da geração de resíduos no processamento da matéria prima e o aumento na reutilização desses resíduos.

Os resíduos de construção civil (RCC), constituem a maior porção de todo o resíduo sólido produzido, com aproximadamente 250 milhões de toneladas por ano somente nos Estados Unidos (MEYER, 2009). Segundo KASAI (2004), o depósito destes resíduos em aterros não é mais de maneira alguma uma opção para estes resíduos, especialmente em países como Japão, onde os aterros não serão mais capazes de receber depósitos em poucos anos. HANSEN e LAURITZEN (2004), afirmam que na Europa, onde a falta de agregado ainda não é tão aguda, a maior parte dos resíduos de construção e demolição é utilizado para base ou sub-base de estradas. Uma vez que os agregados reciclados são geralmente mais baratos do que os agregados de alta qualidade, o seu reaproveitamento constitui em uma forma de reciclagem barata.

Os problemas técnicos para incorporar os agregados reciclados de construção e demolição em novas misturas de concreto são bem conhecidos e tem sido focado em algumas pesquisas (ACI COMMITTEE, 2001), (HANSEN, 1992). A maioria destes problemas pode ser atribuída à grande quantidade de finos encontrados nos agregados reciclados. De acordo com DE PAUW (1981),

agregados reciclados tem geralmente densidades menores em comparação aos agregados convencionalmente utilizados, no caso dos agregados advindos do concreto este fato se deve a pasta de cimento que se mantém aderida às partículas do agregado. Para os agregados cerâmicos isso se dá pela alta porosidade característica encontrada na estrutura destes materiais. Estes fatos também são a principal razão para a alta taxa de absorção dos agregados reciclados em comparação aos naturais. Outra preocupação em relação aos agregados reciclados é a variedade de contaminantes que podem ser encontrados como resultado da demolição de estruturas dentre eles estão o asfalto, gesso, madeira, borracha entre outros. Uma vez que, mesmo pequenas quantidades de contaminantes podem degradar severamente a resistência e a durabilidade do concreto feito com eles, foram estabelecidos limites percentuais para sua utilização. A maioria das reduções em resistência encontradas para concretos feitos com agregados reciclados foram em torno de 5% a 24%, comparados com concretos feitos com agregados naturais. Quando os agregados graúdos e miúdos foram substituídos por agregados reciclados de concreto, as reduções de resistência foram em torno de 15% a 40%, comparados aos concretos produzidos com agregados naturais nos estudos feitos por (MEYER, 2009). Em suma, o concreto produzido com RCC de modo geral apresenta menor qualidade, tendo em vista também, a grande variabilidade destes resíduos obtidos de várias fontes diferentes, o que pode resultar em consideráveis variações de resistência do concreto, mesmo que produzidos com as mesmas proporções de mistura.

Entre as vantagens da reutilização do RCC está o transporte, ao invés de transportar agregados naturais da sua nascente até o canteiro, este é encaminhado diretamente para seu uso nos canteiros de obra, em se tratando de custo para materiais a granel este item tem grande importância. Juntamente com este fato, existe o custo de depósito em aterros, os quais tem se tornado cada vez escassos e menos adequados para este fim. Finalmente, existe o potencial de intervenção governamental. Na Europa e no Japão, os governos não se omitem de tal intervenção. Com frequência e de modo pesado, exigem diretamente a utilização de RCC ou indiretamente aumentando valores de taxas por tonelada de resíduo produzido, como um meio de incentivar a

utilização dos RCC. Nos Estados Unidos as autoridades governamentais tendem a ser mais flexíveis deixando a força de mercado prevalecer na demanda desses serviços, porém, esta situação vem mudando, incitado por um público cada vez mais em sintonia com as demandas de desenvolvimento sustentável, agências locais, estaduais e federais estão cada vez mais promovendo a utilização de materiais reciclados e até mesmo exigindo, especialmente para projetos que são parcialmente ou totalmente financiados com recursos públicos.

É preciso atentar também que, nem todos os concretos necessitam de uma alta performance. Apesar do RCC ser encarado com certas restrições, pode ser bastante aceitável para muitas aplicações, para algumas com especificações de desempenho mais elevadas uma mistura de agregados naturais e reciclados pode fazer sentido econômico e técnico. YELTON (2004), relata uma história de grande sucesso nos Estados Unidos, que foi a reciclagem do aeroporto internacional de Denver Stapleton, onde ao invés de transportar 6,5 milhões de toneladas de concreto e entulhos para aterros, o Recycled Materials Company, Inc., foi capaz de reciclar e reusar todo este material. Eles alegam que este seja o maior projeto de reciclagem do mundo, e o executaram sem nenhum gasto para a cidade local.

No Brasil os problemas encontrados com o RCC, trouxe à tona uma nova lei, que é a **Resolução CONAMA 307, de 5 de julho de 2002**. Ela estabelece várias diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão adequada dos resíduos da construção civil, da mesma forma também diz que os geradores de resíduos de construção e demolição devem ter como prioridade a não geração de resíduos e em seguida a redução, a reutilização e a reciclagem. Tais mudanças só trazem benefícios, visto que combatem o desperdício, e incentiva a racionalização sem diminuir a qualidade de vida.

## 2.2. Definição

Os resíduos de construção civil (RCC), também são denominados de entulho, são provenientes das várias formas de construção civil, demolição, rejeitos, reparos e reformas. Também rejeitos advindos da preparação e

escavação de obras. O resíduo de construção e demolição corresponde a 50% do total de resíduos sólidos produzidos em cidades com uma população superior a 500 mil habitantes (PINTO, 1999; FREITAS et al., 2003, SARDÁ e ROCHA, 2003, CABRAL, 2007).

Os RCC de origem mineral são classificados pela resolução CONAMA 307/2002, agora alterada pela Resolução CONAMA 469/2015 (inciso IV, Art.3º) como:

Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc) produzidas nos canteiros de obras.

Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso; (NR)

Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem/recuperação.

Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados e oriundos de demolições, reparos e reformas de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas, e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Logo, como resposta a esse problema e em reciprocidade à resolução CONAMA 469/2015, a indústria da construção civil, apesar de ser uma das principais geradoras de resíduos, mostra-se também como a maior habilitada para o processo de reciclagem e reaproveitamento, principalmente de seus próprios resíduos. Uma das razões para esta afirmação se dá pela maior facilidade de incorporação destes como componentes do concreto no sistema

construtivo. Ainda de acordo com esta resolução, uma das considerações feitas pela mesma para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos é que, se atente para o fato de que se produza e se utilize materiais provenientes de reciclagem de resíduos da construção civil, observando também a viabilidade técnica e econômica para tal fato.

Os RCC são comumente classificados de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), como materiais da Classe II B – não perigosos e inertes. Contudo, segundo CABRAL (2007) esta classificação poderá se tornar questionável em situações na qual o RCC não seja exclusivamente mineral inerte, apresentando outros materiais agregados como resíduos industriais químicos, metais pesados e radioativos geralmente quando estes resíduos são depositados em locais irregulares. Em sua composição os RCC se diferenciam devido os tipos de sistemas construtivos, tipo de material predominante na região, mão de obra e a tecnologia aplicada. Esta situação o torna um tipo de resíduo bem heterogêneo.

Em 2010, foi homologada a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010a). Esta tem como finalidade regulamentar a gestão de forma adequada dos resíduos, além de favorecer também o desenvolvimento econômico, social e a manutenção da qualidade ambiental.

### 2.3. A GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E GERENCIAMENTO DOS RCC

As áreas urbanas durante todo seu tempo de desenvolvimento têm sofrido várias transformações de acordo com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente na indústria da construção. Tais transformações trazem consigo vários benefícios como a melhoria na qualidade das construções e obras, através da utilização de novos materiais.

Por outro lado, grandes quantidades de matérias primas utilizadas nas construções não vêm sendo aproveitadas de maneira racionalizada, causando a geração de grandes quantidades de resíduos. Em paralelo a esta questão, existe a quase ausência de uma cultura de reciclagem de resíduos urbanos, fato que colabora na geração de grandes quantidades de RCC não assistidas por tratamento algum.

Neste contexto, tem-se também a superpopulação das áreas urbanas ocasionando grande demanda de recursos naturais, logo, em consequência disto ocorre grande geração de resíduos. Infelizmente, não há por parte do estado, nem pelas empresas do setor da construção civil, gerenciamento adequado para minimização da geração de resíduos nas fontes geradoras e de reciclagem.

Para AGOPYAN e JOHN (2003), a grande maioria dos RCC se submetidos a análises ambientais (lixiviação, solubilização por exemplo) seriam classificados como não inertes (plástico por exemplo), ou seja, são resíduos na forma líquida, gasosa ou sólida que, apesar de, não terem capacidade de contaminação ou destruição, sujam a água e a atmosfera. Estes resíduos poderão afetar a qualidade do produto gerado a partir destes resíduos, como também comprometer o meio ambiente.

De acordo com LEITE (2001), a composição dos RCC apresenta uma grande quantidade de materiais de base cimentícia e materiais cerâmicos, isto também pode ser observado nos trabalhos de (ZORDAN 1997), (LATTERZA 1998) e (CARNEIRO et al., 2001). AGOPYAN e JOHN (2003), pode identificar que, em geral, a composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatiba – SP, são originados predominantemente da atividade de construção de edifícios contendo uma proporção maior de resíduos de natureza cerâmica. Estes resíduos quase na sua totalidade podem ser beneficiados como agregados para diversas aplicações de acordo com a composição específica.

De acordo com LOVATO (2007) foi observado que, no Brasil a composição do RCC varia de acordo com cada autor, sendo que, em sua maioria a maior porcentagem da composição de resíduos é de concreto e argamassa, em torno de 50% do total analisado.

Observando os vários processos que acompanham a construção de uma edificação seja ela qual for, é visto que, existe uma grande heterogeneidade na composição dos resíduos gerados. Sendo assim, a composição do RCC é formada principalmente por: Concreto, argamassa, tijolo, telhas, peças cerâmicas, barras de aço, madeira e plásticos. Variando também de acordo com o tipo de processo que originou o resíduo.

VIEIRA (2003), explica que essa grande variabilidade dos resíduos, seria a principal causa da não utilização deste resíduo pelas indústrias. É fato

também que não há um veredito a respeito do comportamento e desempenho do concreto produzido com agregados reciclados, apesar de, este assunto vir sendo abordado em todo mundo (LOVATO, 2007).

Vale ressaltar que os resíduos retirados no próprio canteiro de obras, geralmente, apresentam-se com qualidade inferior devido à sua heterogeneidade pela presença de contaminantes proveniente do processo de produção, quando comparados aos resíduos obtidos diretamente nos pontos de revenda ou aqueles moldados em laboratório.

A figura 02, mostra que já há algum tempo a composição dos RCC encontrados nas grandes cidades do Brasil, apresentam quantidades significativas de material de origem cerâmica. Apesar da maior parte de RCC encontrado serem argamassas e concreto, há uma quantidade significativa de material cerâmico quando se analisa as porcentagens de tijolos, telhas e lajotas no total. Tal fato, também justifica o foco deste trabalho ao estudo específico deste material.

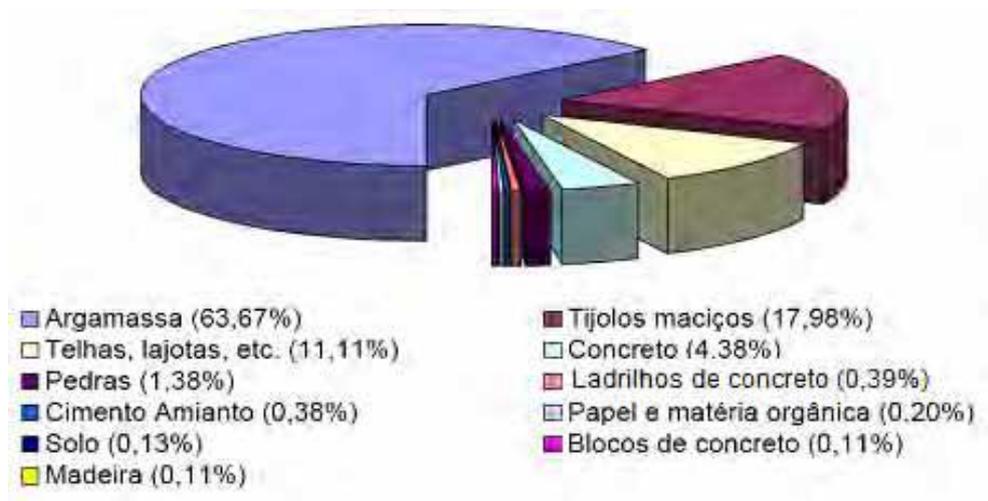


Figura 2- Composição do RCD na cidade de São Carlos/SP (Pinto, 1986).

A seguir na tabela 02, também se pode ver a grande importância a se dar para o aproveitamento em particular do material cerâmico, onde é mostrado um comparativo da composição do RCC.

Tabela 2 - Comparação da composição de RCC (Fonte: LOVATO, 2007).

Componente	%			
	Pinto (1987)	Zordan(1997)	Leite (2001)	Vieira (2003)
Argamassa	63,67	37,40	28,26	27,82
Concreto	4,73	21,10	15,18	18,65
Cerâmica	29,09	20,80	26,33	48,15
Outros	2,20	20,70	30,23	5,38

Na tabela 02, é possível observar que a composição do RCC apresenta grande variabilidade, sendo que, na maioria dos casos percebe-se uma porcentagem maior de argamassa presente no RCC, seguido da cerâmica.

LEVY (2007) ressalta que países como os EUA, Holanda, Bélgica, França, Japão e Alemanha possuem políticas e pesquisas avançadas quanto a reciclagem dos RCC, como agregados, de maneira a garantir padronização e a qualidade do produto. A utilização de agregados reciclados seria uma das formas de resolver alguns dos problemas nos grandes centros urbanos, como a escassez de matéria prima, a falta de espaço para deposição e o custo com a limpeza pública.

A seguir é apresentado na tabela 03 as principais aplicações do agregado reciclado na construção civil.

Tabela 3 – Sugestão de uso para concretos de agregados reciclados

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Objetivos principais de uso</b>
I	Fundações de prédios em geral, fundações de edifícios de apartamentos, edificações residenciais unifamiliares, edificações familiares de um pavimento, fundações pesadas, etc.
II	Fundações para construção de blocos de concreto pré-fabricado, construções leves não residenciais, fundações de máquinas, etc..
III	Fundações de edifícios de madeira, portões, cercas, fundações de máquinas simples, lajes em declive, etc.

Fonte: BCSJ, citado por HANSEN (1992)

Ainda segundo LEVY (2007), na Holanda, o nível de desenvolvimento tecnológico para a utilização dos RCD é o mais elevado em termos mundiais.

Aproximadamente 95% de todo resíduo produzido no país é reaproveitado. Há também uma lei em que todo resíduo com potencial de reaproveitamento não pode ser lançado em aterros, lei esta que foi aprovada em 2000.

Geralmente a gestão de resíduos é feita com os seguintes objetivos, dispostos de maneira hierárquica: reduzir a geração de resíduos da fonte, reutilizar o resíduo como ele é disposto, reciclar o resíduo, incinerar o resíduo, recuperando a energia ou depositá-lo em aterros (LEACH et AL., 1997); (SAKAI et AL., 1996); (MAGRINHO et AL., 2006); (CABRAL et al., 2007).

No âmbito nacional, observa-se que a partir de 2002 diversos instrumentos foram produzidos voltados para o gerenciamento dos RCC, tais como, normas, planos, decretos, leis e resoluções. Esta busca tem o objetivo principal de incentivar o seu reaproveitamento, além, de enquadrarem os municípios e os geradores dos RCC quanto à responsabilidade das partes, tornando-os co-responsáveis pelos resíduos gerados e sua destinação (SCNEIDER & PHILIPPI Jr, 2004).

A tabela 04 apresenta um resumo de todas as normas brasileiras de gestão dos resíduos sólidos e Resíduos de construção civil publicadas pela ABNT em 2004.

Tabela 4- Normas Brasileiras ABNT para Resíduos.

<b>NORMAS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
NBR 10.004	Resíduos Sólidos – Classificação
NBR 15.112	Resíduos da Construção Civil e Resíduos volumosos – Área de transbordo e triagem – Diretrizes para projetos, implantação e operação
NBR 15.113	Resíduos Sólidos da construção Civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.114	Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas para reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.115	Agregados reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camada de pavimentação – Procedimentos
NBR 15.116	Agregados reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos

No gerenciamento dos RCC o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) tornou conhecida sua principal ferramenta para efetivar a redução dos impactos ambientais provocados pela indústria da construção civil, através da Resolução nº 307/2002. Esta resolução do CONAMA apresenta como seu principal objetivo a redução, reutilização e a reciclagem de resíduos, incluindo uma série de etapas de execução como: planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e reforçar as metas estabelecidas para o cumprimento das etapas previstas em programas e planos. Esta resolução não focaliza somente na questão da viabilidade técnica de utilização destes resíduos, mas também, de igual modo na viabilidade econômica. Desta forma, também incentiva a gestão conjunta destes fatores, além de propor diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, discriminando as ações necessárias para redução de impactos ambientais. E ainda preconiza que qualquer empresa é responsável pela geração de resíduos independente do seu porte, logo, a principal meta dada as empresas é a não geração de resíduos. Secundariamente, as empresas têm por dever diminuir a produção de resíduos, e buscar a reutilização dos mesmos da maneira mais limpa e economicamente cabível, de acordo com as particularidades de cada empresa, além de promover a destinação adequada àqueles resíduos inertes, porém, não recicláveis.

Os RCC de fração mineral (cimentícios e cerâmicos) são os únicos resíduos que podem ser reutilizáveis e recicláveis no próprio canteiro de obra, nas mais diversas etapas da obra. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de um programa conscientização quanto à gestão dos resíduos sólidos incluindo a coleta seletiva dentro do canteiro de obra. Desta forma, o entulho gerado terá menor concentração de contaminantes, além de atribuir vantagens econômicas para a obra (ALTHEMAN, 2002).

Ainda na mesma resolução é determinado que os municípios e o Distrito Federal elaborem seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, aproveitando os Programas Municipais de Gerenciamento. Na tabela 05, são mostradas as cidades com serviço de manejo e coleta dos resíduos e seus respectivos processamentos.

Tabela 5 – Municípios, total e com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição, por existência e tipo de processamento de resíduos, segundo as grandes regiões e unidades da federação – 2008.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios								
	Total	Com serviço de manejo dos resíduos de construção e demolição							
		Total	Existência e tipo de processamento dos resíduos						Outro
			Total	Triagem simples dos resíduos de construção e demolição reaproveitáveis (classes A e B)	Triagem e trituração simples dos resíduos classe A	Triagem e trituração dos resíduos classe A, com classificação granulométrica dos agregados reciclados	Reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos		
<b>Brasil</b>	<b>5564</b>	<b>4031</b>	<b>392</b>	<b>124</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>79</b>	<b>204</b>	
<b>Norte</b>	<b>449</b>	<b>293</b>	<b>29</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>6</b>	<b>18</b>	
Rondônia	52	28	9	-	-	-	3	6	
Acre	22	6	-	-	-	-	-	-	
Amazonas	62	39	6	3	-	-	2	1	
Roraima	15	1	1	-	-	-	1	-	
Pará	143	117	12	2	-	-	-	10	
Amapá	16	4	-	-	-	-	-	-	
Tocantins	139	98	1	-	-	-	-	1	
<b>Nordeste</b>	<b>1793</b>	<b>1454</b>	<b>178</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>6</b>	<b>32</b>	<b>118</b>	
Maranhão	217	139	6	3	3	1	-	3	
Piauí	223	121	1	-	-	-	-	1	
Ceará	184	167	31	2	2	1	2	28	
Rio Grande do Norte	167	141	42	4	4	-	3	38	
Paraíba	223	189	6	4	4	1	1	3	
Pernambuco	185	157	23	5	5	1	5	12	
Alagoas	102	87	22	9	9	2	10	6	
Sergipe	75	69	5	-	-	-	-	5	
Bahia	417	384	42	11	11	-	11	22	
<b>Sudeste</b>	<b>1668</b>	<b>1272</b>	<b>109</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>12</b>	<b>25</b>	<b>38</b>	
Minas Gerais	853	682	45	15	15	2	11	19	
Espírito Santo	78	60	3	2	2	-	-	1	
Rio de Janeiro	92	64	9	6	6	-	1	1	
São Paulo	645	466	52	27	27	10	13	17	
<b>Sul</b>	<b>1188</b>	<b>639</b>	<b>54</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	
Paraná	399	272	22	10	10	1	6	6	
Santa Catarina	296	111	11	4	4	1	2	4	
Rio Grande do Sul	496	256	21	10	10	-	6	6	
Centro- Oeste	466	373	22	7	7	-	2	14	
Mato Grosso do Sul	78	60	10	1	1	-	-	10	
Mato Grosso	141	80	5	1	1	-	2	2	
Goias	246	232	6	4	4	-	-	2	
Distrito Federal	1	1	1	1	1	-	-	-	

(Fonte: www.ibge.gov.br)

Ainda de acordo com a resolução, cabem aos geradores dos resíduos de construção das atividades de construção, reformas, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos, a responsabilidade quanto ao gerenciamento e destinação final do mesmo. Deste modo podemos encontrar um arcabouço de normas técnicas que regulamentam o manejo de RCC, estas foram disponibilizadas pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil:

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

Apesar desta intensa busca pela normatização, infelizmente tem-se na realidade que, na maioria das vezes, a maior parte dos RCC é depositada em aterros sanitários ou simplesmente são descartados irregularmente em vias públicas. Logo, esse tipo de depósito carrega consigo grande probabilidade de contaminação do meio ambiente, além das pressões pela preservação ambiental são fatores que ratificam a necessidade de soluções sustentáveis para os resíduos de construção (CABRAL, 2007).

Pode-se afirmar que, a grande beneficiária com aplicação do gerenciamento adequado dos RCC, nos centros urbanos decorrente da difusão da prática de reciclagem, será a sociedade de forma geral. A gestão dos RCC requer mudanças e iniciativas no setor da construção civil contemplando o poder público, a iniciativa privada, até os pequenos geradores (moradores

urbanos). Tais práticas incluem a criação de plantas de reciclagem, coleta seletiva dentro dos canteiros de obra, transportes regulamentados para a disposição dos resíduos até os locais licenciados, coleta regular das caçambas que servem de depósito de resíduos e a implantação de aterros de RCC.

## 2.4. OS RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA

De acordo com CALLISTER (2005), os materiais cerâmicos são compostos inorgânicos e não metálicos, que possuem em sua constituição elementos metálicos e não metálicos. Estes materiais também apresentam dureza elevada, porém, são altamente frágeis possuindo também boa resistência a temperaturas elevadas.

### 2.4.1. Cerâmica

#### 2.4.1.1. Classificação da Cerâmica

Os materiais cerâmicos são definidos como materiais formados por duas composições sendo por elementos metálicos tais como: Al, Na, K, Mg, Ca, Si e por elementos não metálicos como: O, S, N, C e P, todos esses elementos são formados por fortes ligações iônicas, covalentes ou predominando uma dessas ligações. Os elementos metálicos são aqueles encontrados do lado esquerdo a tabela periódica e tem como característica perder facilmente os seus elétrons de valência, os elementos não metálicos estão dispostos do lado direito da tabela periódica. Entre esses elementos está entre o silício que é um dos principais elementos constituintes dos materiais cerâmicos de construção, sendo provavelmente o principal responsável pelo efeito pozolânico encontrado em trabalhos recentes com a utilização dos finos cerâmicos em concretos.

#### 2.4.1.2. Argila como Matéria Prima

A argila é utilizada No Brasil a produção de argila se dá em grande escala, sendo um dos maiores produtores e consumidores e cerâmica. A produção mensal de cerâmica está em torno de 4 bilhões de blocos de

vedação e estruturais e 1,3 bilhão de telhas, enquanto que o faturamento é superior a R\$ 18 bilhões anuais (ANICER, 2014).

A argila é utilizada em diferentes modos, Teixeira e Neto (2009), definem argila como sendo um material inorgânico natural, terroso, de grãos finos, que adquire certa plasticidade quando misturado com água. Prado (2009), considera algumas definições, os ceramistas definem argila como um material natural que misturado a uma quantidade adequada de água se torna uma pasta plástica. Sedimentologistas afirmam que a argila é um termo granulométrico abrangendo todo o sedimento em que prevalecem partículas de diâmetro esférico  $\leq 2\mu\text{m}$ , petrologistas afirmam que a argila é uma rocha, ou seja, um agregado na maior parte do tempo friável e com partículas muito finas não visíveis a olho nu. Os mineralogistas definem a argila como um mineral ou uma mistura de minerais onde há grande predominância dos argilominerais que são silicatos hidratados onde estão presentes os cátions alumínio, ferro, potássio e magnésio. Pedologistas afirmam que são partículas de dimensões coloidais menores que  $0,1\mu\text{m}$  sendo a fração mais ativa de um solo e responsável por fixar cátions e ânions.

VIEIRA et al (2005), afirma que as argilas são constituídas essencialmente por argilominerais, podendo conter outros minerais em sua mistura como, feldspato, quartzo, mica, calcita, hematita, além da matéria orgânica. GOMES (1988), afirma que, quando a argila é submetida a pulverização e misturada com água em boa quantidade, ela torna-se plástica e logo após quando seca se torna bastante rígida; quando queimada a temperaturas acima de  $1000^{\circ}\text{C}$  adquire elevada dureza.

É possível perceber que a argila se apresenta na natureza composta por vários minerais diferentes, por isso considerada um material heterogêneo, onde as características são ligadas à sua formação geológica e local de extração. Em geral, as argilas são materiais heterogêneos e suas características dependem da sua formação geológica e da localização da extração. As propriedades do produto final estão intimamente relacionadas às características iniciais das matérias primas, tendo como exemplo a granulometria, plasticidade e composição mineralógica (MACEDO et al., 2008).

#### 2.4.1.3. A Utilização na Construção Civil

A produção da cerâmica vermelha se dá desde a antiguidade, onde alguns povos produziam artefatos cerâmicos como vasos, jarros, potes entre outros. A produção se dava através do processo de queima para obtenção do produto final.

É perceptível a grande utilidade e demanda da cerâmica vermelha na construção civil (telhas e tijolos), devido ao seu ótimo desempenho, resistência, durabilidade e no isolamento térmico e acústico. Sendo assim, este material vem sendo utilizado desde a antiguidade e hoje de forma mais intensa, logo, surgem as grandes quantidades de resíduos destes materiais.

Segundo dados da Associação Brasileira de Cerâmica (ABC, 2009), o consumo de cerâmica vermelha no Brasil chega a 70 milhões de toneladas por ano. O mercado dispõe de aproximadamente 11.000 empresas de pequeno porte, espalhadas praticamente por todas as regiões do país. De acordo com o Instituto de pesquisas tecnológicas (IPT, 2014), essa produção de cerâmica vermelha já chega a 130 milhões de toneladas por ano, sendo que 5% desse material é rejeitado. De acordo com este Instituto a destinação desse rejeito tem sido para o reaproveitamento como matéria prima para nova massa cerâmica (estabelecendo-se a moagem e a proporção de utilização, em segundo lugar é utilizado como aditivo mineral ativo, de ação pozolânica em argamassas e artefatos de cimento.

Na construção civil, o resíduo de cerâmica vermelha também vem sendo utilizado em obras de pavimentação, preenchimento de valas de instalações e como agregado para fabricação de tijolos, aproveitando sua parte fina, concreto leve com alto poder de isolamento térmico, sendo também largamente estudada como agregado para concreto não estrutural já há alguns anos (CABRAL, 2007). A cerâmica vermelha também é considerada como o resíduo que apresenta maior porosidade e menor resistência mecânica quando comparados aos concretos convencionais (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

#### 2.4.1.4. A Reciclagem da Cerâmica Vermelha como agregado

A indústria da construção civil apresenta vários ramos de aplicação para estes resíduos, e um grande potencial para absorver estes resíduos cerâmicos, tendo como consequência a diminuição da procura por recursos naturais e minimizando os problemas de geração de resíduos.

A prática de reciclagem das cerâmicas vermelhas como agregado reciclado para a produção de novos concretos e argamassa vem adquirindo maior proporção no setor da construção civil, principalmente no território nacional, apesar de possuírem algumas limitações em virtude principalmente de sua porosidade.

Apesar das suas limitações, os resíduos de cerâmica vermelha, quando submetidos aos processos de beneficiamento adequado, podem ser utilizados na produção de argamassas de assentamento, revestimento (como agregado miúdo reciclado) e enchimento, assim como, na confecção de concretos (agregados graúdos reciclados) a partir da substituição dos agregados naturais.

De acordo com FERNANDES, SOUSA e DIAS (2004), na Europa a quantidade de resíduos nos diferentes estágios de produção da indústria cerâmica atinge em torno de 3 a 7% da produção total de resíduos, o que significa milhões de toneladas de cerâmicas calcinadas ao ano que são rejeitadas. Com o aumento das restrições de depósito nos aterros nas áreas da União Europeia, o custo do depósito aumentara e as indústrias terão que encontrar outros meios para reusar seus resíduos. Embora a reutilização dos resíduos de cerâmica esteja sendo praticada, a quantidade de resíduos reutilizados ainda é desprezível quando comparados a produção dos mesmos. Consequentemente, a necessidade para a aplicação destes resíduos em outras indústrias tem se tornado absolutamente vital.

TORGAL e JALALI (2010), afirmam que, a indústria da construção como usuário final de quase todo o material cerâmico produzido é o mais apto para resolver este problema ambiental que é em grande parte seu somente. A natureza da indústria da construção, especialmente a indústria do concreto é uma grande aliada para o reuso deste resíduo, podendo ser utilizado seguramente sem a necessidade de transformações drásticas para produção e o processo de aplicação. Por um lado, o custo de depósito dos resíduos

cerâmicos em aterros será solucionado, por outro lado também, a matéria prima e os recursos naturais serão repostos, trazendo economia de energia e proteção ao meio ambiente. De acordo com METHA, (2001) e MEYER, (2009) a melhor maneira da indústria da construção se tornar cada vez mais sustentável é utilizando resíduos de outras indústrias como materiais de construção.

Existe ainda a possibilidade de utilização do agregado cerâmico como adição para o concreto junto com o cimento, uma vez que, a produção de cimento requer uma quantidade muito grande de energia e implica na extração de grandes quantidades de matéria prima da terra, além de emitir para atmosfera toneladas de gases tóxicos. Essa reposição da cerâmica como adição no concreto representa uma grande economia de energia e traz consigo excelentes benefícios ao meio ambiente. Alguns autores como PUERTAS et al (2008), NACERI (2009) e LAVAT (2009), já confirmaram a reatividade pozolânica dos resíduos finos da cerâmica, porém, ainda são muitos escassos os estudos a esse respeito, bem como sobre a performance da durabilidade do concreto, o que é um ponto chave para expansão da utilização deste material em concretos. A mesma ideia é aplicada também para a utilização dos agregados cerâmicos para produção do concreto, tendo em vista que este é o principal objetivo deste trabalho.

### **3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS.**

#### **3.1. Características do Agregado Reciclado**

Entre os principais destaques no estudo dos agregados reciclados está a grande variabilidade nas características desses agregados, uma vez que, os agregados naturais apresentam características mais constantes. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), características importantes dos agregados como: porosidade, composição química, granulometria, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão e módulo de elasticidade são fatores que influenciam diretamente no comportamento do

concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. A seguir serão abordadas algumas dessas propriedades.

### 3.1.1. Porosidade e absorção de água

Para os agregados convencionais, por apresentarem pouca porosidade, a questão da absorção é considerada insignificante, ao passo que, para os agregados reciclados esta característica é imprescindível para a qualidade da mistura, uma vez que estes possuem alta porosidade. Esta influência, para KAZMIERCZAK (2007), está relacionada com a quantidade, dimensão e distribuição dos poros presentes nos agregados, em especial os de origem cerâmica.

As cerâmicas vermelhas são consideradas materiais com elevada porosidade o que lhe confere alta taxa de absorção quando comparadas aos agregados naturais. Porém, apesar da estrutura porosa dos materiais cerâmicos, na maioria dos casos, estes possuem resistência mecânica compatível à exigência que lhe é conferida (DIAS e AGOPYAN, 2004).

Tendo em vista que o agregado reciclado de cerâmica vermelha oferece grande porosidade, e em consequência deste fato a alta absorção de água em seus poros, MACEDO et al. (2008) avaliou o comportamento das argilas utilizadas industrialmente na produção de blocos cerâmicos no estado da Paraíba, o qual verificou-se que as amostras que apresentaram maior absorção.

Por outro lado, as amostras com elevada plasticidade favoreceram a obtenção de peças com menor absorção e, por conseguinte, maior resistência mecânica. Para o autor, este fato está associado não somente a composição mineralógica, mas também ao teor de matéria orgânica o que influenciou na plasticidade, além, do controle de temperatura durante a queima.

Em relação ao percentual de absorção dos agregados reciclados, resultados obtidos por TAM et al. (2006) revelaram que, normalmente, os agregados reciclados de RCC possuem taxa de absorção de água muito maior que os agregados convencionais, variando esta taxa em torno de 3 a 10%, enquanto que os agregados convencionais este percentual varia de 1 a 5 %. Em amostras contendo apenas agregados reciclados cerâmicos, BRITO et al.

(2004), encontrou valores de absorção de água na ordem de 12%, sendo que para os agregados convencionais este percentual foi de 1%.

Este comportamento está relacionado a maior quantidade de poros apresentando fissuras na sua superfície, são menos densos e mais fracos o que lhes conferem alta taxa de absorção de água quando comparados aos agregados naturais. Assim, para a maioria dos pesquisadores é necessário o pré-umedecimento destes agregados antes da sua aplicação (ANDRADE et al., 2004; LEVY, 1997; CABRAL, 2007). Com relação ao pré-umedecimento do agregado reciclado no concreto antes de sua aplicação no concreto, (CARRIJO, 2004; LEITE, 2001 e BUTTLER, 2003) relatam que os agregados reciclados absorvem cerca de 50% da água durante os 10 primeiros minutos de imersão.

É possível perceber que não existe ainda uma unanimidade com relação ao grau de absorção de água ou o tempo aproximado de saturação máxima dos agregados reciclados, tendo em vista, como já foi mencionado anteriormente a grande variabilidade nas características desses agregados. Tal fato, é resultante do método de produção do produto inicial desses agregados antes da reciclagem ou beneficiamento dos mesmos, bem como do próprio processo de adequação deste material para o seu uso como agregado em concretos.

### 3.1.2. Massa Unitária, Massa Específica, Granulometria.

Para fins de dosagem dos concretos faz-se necessário conhecer a massa específica, que é definida como a massa do material, incluindo os poros internos, por unidade de volume. A massa unitária corresponde a massa das partículas dos agregados que ocupam por unidade de volume, uma vez que o volume é ocupado tanto pelos agregados como pelos vazios entre eles (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

CABRAL (2008) ressalta que em geral, os agregados reciclados possuem massa específica e massa unitária menor que as dos agregados naturais. Segundo o autor, este fato é decorrente de algumas características apresentadas pelos agregados reciclados como menor densidade, alta

porosidade, formas irregulares das partículas, além, da sua granulometria. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por LEITE e DAL MOLIN (2002) em estudos realizados com agregados reciclados de RCC na produção de concretos, onde foi constatado que as massas específicas e unitárias foram bem menores que a dos agregados naturais. Este fato é confirmado por SIMONETTI e LINTZ (2008) que verificaram que os agregados naturais apresentaram massa específica e unitária maior que os agregados reciclados de RCC.

BRITO et al. (2004) explica que os menores valores obtidos para as massas do RCC, é decorrente da porosidade dos agregados reciclado de cerâmica, este fato influenciou na produção de concretos com menor massa específica no estado fresco, isto ocorreu, à medida que se aumentava a substituição dos agregados convencionais pelos agregados reciclados, apresentando uma correlação quase linear.

BAZUCO (1999), LIMA(1999), BANTHIA e CHAN(2000) e LEITE(2001), afirmam que os agregados reciclados tanto graúdos como os agregados miúdos tendem a apresentar granulometria um pouco mais altas do que os agregados convencionais. Desta forma, o módulo de finura resulta em valores mais altos. Esta característica é influenciada diretamente pelos tipos de resíduos, o tipo de britagem e suas regulagens internas. Para LEITE (2001), quanto maior for módulo de finura dos agregados, maior também é o tamanho das partículas, fator este que segundo o autor, causa diminuição da superfície específica dos agregados, tendo como consequência, menor quantidade de pasta para lubrificar os grãos.

Segundo BARRA (1996), a granulometria exerce influência direta na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, e isto está diretamente relacionada com o processo de produção dos agregados. Além disso, segundo COUTINHO (1997), a forma dos agregados exerce influência direta nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

É interessante ressaltar que na cidade de Belém no estado do Pará são encontrados agregados miúdos naturais com módulo de finura pequeno, quando relacionados aos agregados de outras regiões do país. Este fato é favorável na utilização de frações mais finas do agregado reciclado miúdo para

substituição do agregado miúdo natural no concreto, uma vez que o agregado miúdo natural se encontra cada vez mais escasso na região.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO.

#### 3.2.1. Comportamento do Concreto com Agregado Reciclado no Estado Fresco –Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é um fator que sofre influência de uma série de propriedades físicas, tais como: o ângulo de atrito interno, a coesão, a viscosidade, a massa específica, a segregação e a exsudação (COUTINHO, 2000). Apesar de ser amplamente utilizado, o ensaio de tronco de cone nem sempre é eficiente para obtenção da correta avaliação da trabalhabilidade de concretos, em alguns casos necessitando-se do ensaio de vibração Vebe, apesar deste ser mais adequado a concretos com baixa trabalhabilidade (LEITE, 2001).

Segundo CECCATO (1998), MEHTA e MONTEIRO(1994), a trabalhabilidade não é uma propriedade que diz respeito somente ao concreto, tendo em vista que ela está relacionada também com a aplicação que se dará ao concreto e aos equipamentos a serem utilizados para sua mistura, transporte, lançamento e adensamento.

Com relação aos agregados reciclados, CARRIJO (2005), afirma que a capacidade de absorção dos agregados reciclados de RCC, também está relacionada à sua área superficial, variando de acordo com o tipo de agregado, porém, sabe-se que em sua maioria os agregados reciclados apresentam uma elevada porosidade em relação aos agregados naturais, aumentando sua capacidade de absorção. Dessa forma, os agregados reciclados quando estão secos absorvem grande parte da água de amassamento, prejudicando a trabalhabilidade dos concretos produzidos com estes agregados, dificultando o processo de hidratação das partículas de cimento.

LEITE (2001) ressaltou em seu trabalho que a alta absorção de água por parte dos agregados diminui a trabalhabilidade e também aumenta a relação água/cimento ( $a/c$ ), visto que, a água de amassamento é absorvida pelo agregado deixando em falta água para hidratação do cimento.

CARRIJO (2005) também ressalta que os agregados reciclados estando em condição seca, tendem a absorver uma quantidade significativa da água de amassamento dos concretos. Este comportamento prejudica sua trabalhabilidade e dependendo da quantidade poderá interferir na hidratação das partículas de cimento, pois reduzirá a quantidade efetiva de água da mistura.

Ensaio realizados por BUTTLER (2007) em concretos dosados com diferentes teores de substituição dos agregados naturais por agregados graúdo e miúdo de RCC demonstraram que estes concretos obtiveram uma perda de trabalhabilidade bem maior do que os obtidos nos concretos de referência.

Esta observação é confirmada por NEVILLE (1923), em que relata que quando o agregado graúdo é utilizado seco, certa quantidade de água da mistura será retida em seus poros levando-o a condição saturada, assim, reduzindo a quantidade de água de amassamento.

Apesar do grande efeito da porosidade nesta propriedade, tem-se que, também é necessário levar em consideração outras características do agregado reciclado como o formato e a textura das partículas. Essas características têm também influência na diminuição da trabalhabilidade do concreto produzido com a utilização do agregado reciclado.

### 3.2.2. Comportamento no Estado Endurecido

#### 3.2.2.1. Resistência à Compressão Axial

Com relação a análise da resistência à compressão axial, alguns fatores têm grande importância, como as propriedades dos agregados reciclados utilizados, o teor de substituição e os níveis de resistência em que o concreto será submetido. Quanto menores forem esses níveis, menores serão as diferenças de valores de resistência à compressão axial de acordo com (LEITE 2001) e (BAZUCO 1999).

É possível observar que agregados reciclados tanto de concreto quanto cerâmicos, apresentam características físicas, químicas e mineralógicas que não são favoráveis para resistência à compressão, quanto os agregados

naturais. Tal situação é decorrente do elevado grau de porosidade dos agregados reciclados que necessitam de uma demanda grande quantidade de água para efetuar as misturas experimentais, o que por sua vez tende a causar um déficit considerável na resistência à compressão destes concretos.

De acordo com KHATIB (2005), à medida que ocorre o aumento do teor de substituição do agregado convencional pelo reciclado, tanto pelo agregado de concreto quanto cerâmico, há uma tendência na perda de resistência à compressão dos concretos. EVANGELISTA e DE BRITO (2007), observaram que até 30% de substituição do agregado miúdo natural pelo miúdo cerâmico, não ocorria divergências.

DE JUAN verificou queda na resistência à compressão de concreto contendo RCC, independente do teor de substituição. Concretos reciclados com porcentagem de agregados reciclados até 50% apresentam queda de resistência à compressão de 5 à 10%, enquanto que concretos reciclados com porcentagem de agregados de 100% apresentam queda de resistência à compressão de 10 à 15%. Por outro lado, em pesquisas realizadas por HANSEN (1992) foi constatado um desenvolvimento de resistências idênticas ao dos concretos convencionais. ZAMPIRON, L. C., DE SOUZA, R. A., OLIVEIRA, A. L. (2009), encontraram valores superiores de resistência mecânica para argamassas produzidas com cerâmica vermelha em relação as argamassas convencionais, promovendo um grande potencial para redução do consumo de cimento.

PINTO (1999) ressalta que a prática de utilização dos RCC na produção de argamassas vem se consolidando por diversas empresas de construção. Em ensaios realizados com agregado reciclado cerâmico na produção de argamassas demonstraram desempenho satisfatório quanto à resistência à compressão.

#### 3.2.2.2. Durabilidade

A partir do início do século 20, o concreto tornou-se largamente utilizado no mundo inteiro, pela sua grande utilidade e durabilidade na proteção das estruturas de modo geral. No entanto, após o início da segunda metade do século, ouve uma conscientização da diminuição da durabilidade devido aos

novos métodos construtivos que foram sendo implantados, diminuindo tempo de construção e cobrimento das armaduras com peças mais reduzidas, aumentando esforços e esbeltês das edificações atingindo diretamente a durabilidade das estruturas. No Brasil essa conscientização veio a partir dos anos 90, devido ao crescente número de estruturas deterioradas e o aumento dos pesquisadores e centros de pesquisa específicos para estudos da durabilidade do concreto, sendo desenvolvidas normas brasileiras para padronização da durabilidade.

Em sùmula, apesar do progresso na questão normativa, o conhecimento acerca do comportamento do concreto em relação a durabilidade, ainda é muito escasso (BRAVO et al., 2015). Mesmo com alguns estudos recentes, ainda não existe um veredito em relação a durabilidade dos concretos produzidos com agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha, uma vez que este material apresenta grande variabilidade em suas características e propriedades de acordo com a região e métodos de fabricação e construtivos.

A durabilidade dos concretos pode ser avaliada pela mensuração das características de permeabilidade do concreto (LAMPACHER e BLIGHT, 1998). Além disso, ainda depende das interações do concreto com o ambiente, no qual a penetração de materiais deletérios é altamente significativa e a penetração pode ser considerada somente controlada pelas propriedades de permeabilidade da superfície do concreto. Os diferentes mecanismos de transporte são importantes propriedades físicas do concreto em relação à durabilidade, uma vez que, a relação exata varia de acordo com o teste e uma tendência generalizada pode ser estabelecida de acordo com os experimentos realizados (BASHEER, KROOP, CLELAND, 2001). Além disso, a maior influência nas propriedades de durabilidade tem a ver com a composição dos agregados reciclados (BRAVO et al., 2015).

### 3.2.2.3. Transporte de massa e agentes agressivos no concreto.

Vários mecanismos podem ocorrer dentro de um material poroso, no concreto, por exemplo, podem ocorrer a permeabilidade, difusão e absorção capilar. Geralmente esses mecanismos não ocorrem de forma isolada, sendo

que, é adotado um deles como o mecanismo que prevalece sobre os outros para que haja uma simplificação, melhor entendimento e posterior intervenção para melhorar a durabilidade do material. Para KROOP (1995), o concreto quando em condição não saturada o mecanismo predominante é a absorção capilar.

O movimento de gases, líquidos e íons através do concreto é chamado de permeação. Alguns processos de permeação realizados por substâncias deletérias através do concreto são a difusão, absorção e permeabilidade. A infiltração de água no concreto promove tanto a penetração de materiais deletérios quanto de cloretos e íons sulfatos, os quais podem levar a corrosão das armaduras no concreto.

#### 3.2.2.3.1. Permeabilidade

Com relação à permeabilidade, trata-se do grau de facilidade com que os fluidos penetram e se deslocam através do concreto, este fenômeno não depende apenas da porosidade do concreto, mas está relacionado também das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997). Este mesmo autor ainda afirma que, a permeabilidade do concreto se faz presente na continuidade de poros com diâmetros entre 120 e 160  $\mu\text{m}$ . ISAIA (2005) define permeabilidade como fluxo de um fluido que ocorre devido a diferença de pressões. Historicamente, a permeabilidade a água era um parâmetro utilizado para caracterização do concreto em relação a avaliação da durabilidade, uma vez que gerava informação sobre a conectividade dos poros.

BARIN (2008), afirma também que a permeabilidade está vinculada as propriedades do material utilizado, bem como as características físicas e químicas dos aglomerantes e agregados, o teor dos materiais presentes nas misturas e a relação a/c. Fatores externos também causam influencia na permeabilidade do concreto tais como: ambientes com gases agressivos, umidade relativa, temperatura de exposição do concreto.

A permeabilidade do concreto define o quanto o material será suscetível ou não as patologias. Em uma matriz cimentícia de estrutura compacta, o ataque a estrutura do concreto ficará retida somente na superfície, enquanto que, para uma estrutura que apresenta alta porosidade, os ataques terão um grau de profundidade maior (MOREIRA et al., 2001). Este mecanismo no concreto é influenciado por vários fatores, dentre eles os tipos de materiais utilizados, idade, tipo de cura condicionamento dos ensaios. Os fatores utilizados para a confecção do concreto que aumentam a porosidade e a conectividade entre a rede de poros, aumentaram também o coeficiente de permeabilidade tais como: a redução do consumo de cimento que reduz a permeabilidade, devido ao aumento da zona de transição pelo maior volume de agregados na mistura, aumento da relação água/cimento aumenta a permeabilidade, o aumento da dimensão máxima característica, o que permite constatar que os coeficientes das pastas são bem menores do que dos concretos (ISAIA, 2005). A utilização de finos e aditivos, como sílica ativa, diminui o coeficiente de permeabilidade, devido melhorar a zona de transição e bloquear os poros menores (ANDRADE, 1997).

#### 3.2.2.3.2. Absorção por Capilaridade

De acordo com ISAIA (2005), os materiais e construção raramente encontram saturados. Um dos principais mecanismos de penetração de líquidos é o transporte por capilaridade, em que pequenos poros presentes na estrutura do material produzem grandes forças capilares que controlam a entrada de líquido.

A absorção por capilaridade é um fenômeno que necessariamente ocorre em estruturas porosas e que consiste na atração dos fluidos em contato com a superfície do material através de seus poros. O volume de poros do concreto é medido pela absorção do concreto, isto não tem relação alguma com a facilidade com que um fluido pode ou não penetrar no concreto, uma vez que não é admitida uma relação entre elas (NEVILLE, 1997).

NEPOMUCENO (2005), afirma que a absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais prejudica a durabilidade do concreto, em

especial estruturas expostas aos ciclos de molhagem e secagem provocados pelas chuvas. ISAIA (2005), conclui que o potencial capilar é originado pela força capilar quando da tensão superficial da água e as paredes dos poros, sendo que, a tensão depende do grau de umidade interna do concreto, temperatura, densidade e viscosidade da água, e das características dos poros como raio, conectividade e tortuosidade.

A absorção por capilaridade segundo BRAVO et al, (2015), consiste na penetração de um fluido no concreto, através da ação de gradientes de pressão. Isto ocorre quando o líquido entra em contato com os poros e é causado pelas forças de capilaridade, os quais aumentam quanto menor for o diâmetro dos poros. (BRAVO et al, 2015).

Segundo BARIN (2008), as moléculas superficiais de um líquido estão vulneráveis às forças de atração de outras moléculas próximas, logo, os poros capilares também exercem força sobre as moléculas do líquido que também exerce força sobre as moléculas adjacentes, fazendo com que haja até mesmo a absorção em ascensão vertical do líquido que só se estabiliza quando o peso do líquido se iguala as forças de atração dos poros. Quanto menor o tamanho dos poros maior tende a ser a pressão no interior dos poros tornando assim a absorção de água pelo concreto mais rápida e intensa (MEHTA e MONTEIRO, 1994). HELENE (1993), afirma que para ocorrer a absorção capilar os poros do concreto não podem estar saturados, e precisam estar secos ou parcialmente saturados.

Ainda que a água que ingresse nos poros esteja livre de agentes agressivos, ela pode causar danos ao concreto devido a lixiviação, sendo um solvente natural que pode causar a dissolução de vários elementos constituintes o concreto. Existem dois casos onde as pressões capilares aumentam e intensificam o processo e absorção capilar no concreto, uma é quando ocorre redução do fator  $a/c$  causando a redução do diâmetro dos poros do concreto, e a outra quando da utilização de adições minerais causando o refinamento dos poros (ISAIA, 2005). Além disso, a absorção do concreto é de difícil controle, tendo em vista que depende do diâmetro dos poros e de como essa rede de poros está intercomunicada, tornando a migração de agentes

agressivos mais ou menos acessível às armaduras, podendo desencadear o processo de corrosão das mesmas.

Para atenuar a alta absorção, uma solução seria diminuir a continuidade dos poros através da utilização de incorporadores de ar. CAMARINI (1999), afirma que a absorção capilar é mais importante para a durabilidade do que a permeabilidade, em relação a penetração de fluidos no concreto. Toda estrutura de concreto exposta ao meio externo está passível de condições de molhagem e secagem, logo, como a absorção capilar trata do transporte de fluidos em poros não saturados, torna-se de grande importância a sua avaliação, uma vez que, esta propriedade tem importância relevante no transporte de água e de outros agentes de degradação para o interior do concreto (BARIN, 2008). CABRAL (2007), também encontrou valores de absorção de água para agregados de cerâmica vermelha bem superiores aos agregados naturais, chegando a uma diferença de mais de 10% para agregados miúdos e 14% para os agregados graúdos.

#### 3.2.2.3.3. Difusão

O CO<sub>2</sub>, íons cloreto e o oxigênio penetram no concreto, por meio do fenômeno da difusão, o que torna este tipo de evento muito importante para o estudo de patologias no concreto armado, uma vez que, a ação combinada destes agentes agressivos precedido da carbonatação provoca a corrosão das armaduras no concreto (BARIN, 2008). Com relação a durabilidade do concreto, os gradientes de concentração são mais importantes do que a permeabilidade. A difusão tem sua maior intensidade quando os poros do concreto se encontram parcialmente saturados, em torno de 50 a 80% de umidade relativa, entretanto, quando os poros se encontram completamente secos ou completamente saturados a ocorrência desse mecanismo é largamente dificultada (ISAIA, 1999).

Segundo GIROTTO e DE PAOLI (1998), a difusão ocorre devido a um gradiente de concentração e a migração devido a efeito de campo elétrico, sendo que, a difusão ocorre para ânions, cátions e qualquer outra espécie

capaz de mover-se e a migração apenas para espécies carregadas, devido à presença e dipolos permanentes ou dipolos induzidos.

HELENE (1993), diz que a difusão é um processo natural de transporte de massa, dentro de um sistema físico e químico, através de efeitos de concentração proporcionados por dois meios aquosos em contato, sendo estes a solução nos poros do concreto e no meio ambiente. CASCUDO (1997), diz que o processo de difusão iônica acontece devido aos gradientes de concentração iônica, podendo ocorrer entre o concreto e o meio externo ou somente no interior do concreto através de fluidos sejam líquidos ou gasosos.

MEDEIROS (2008), afirma que a difusão ocorre pelo transporte de íons na solução dos poros do concreto, causados por uma diferença de concentração desses íons em diferentes regiões do concreto, provocando o fluxo de íons do meio mais concentrado para o menos concentrado. Em contrapartida ao que ocorre nos mecanismos de permeabilidade e de absorção capilar, a difusão não depende do fluxo de água para ocorrência da penetração de cloretos e sim da existência de eletrólitos e de um gradiente de concentração do concreto.

Para FIGUEIREDO e NEPOMUCENO (1997), os poros capilares de maior tamanho funcionam como ótimos canais para o transporte de  $\text{CO}_2$ , os quais se comunicam com pequenos canais cheios de solução, e que acabam retardando o processo de difusão. Em concordância a este fato NEVILLE (1997), diz que a difusão do  $\text{CO}_2$  na água chega a ser 4 vezes menor que sua difusão através do ar. A seguir na figura 03, é mostrado o processo de difusão de cloretos.

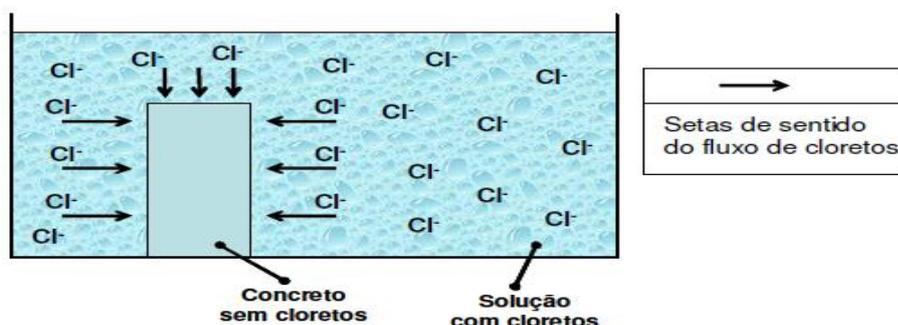


Figura 3- Processo de difusão de cloretos (MEDEIROS, M. H. F. de, 2008).

### 3.2.2.4. Análise de Mecanismos Combinados

#### 3.2.2.4.1. Resistência Elétrica

A resistividade elétrica (RE) tem grande importância no estudo do concreto, uma vez que através desta característica percebe-se a suscetibilidade do concreto a passagem de corrente elétrica por meio da sua estrutura, afetando também sua durabilidade.

SILVA, P. C., FERREIRA, R. M., FIGUEIRAS, H. (2012), afirmam que a resistividade elétrica do concreto está ligada diretamente com a microestrutura da matriz do concreto, estrutura dos poros, tortuosidade e distribuição dos diâmetros dos poros. Entre os fatores que controlam o aumento da RE está o grau de hidratação da pasta, temperatura, umidade relativa constante e a relação água/cimento, quanto menor a relação água/cimento, maior o valor de resistência elétrica do concreto. Existe uma grande variedade de técnicas para avaliação da RE em concretos, podendo ser em corrente contínua (CC) ou alternada (CA), e também variando o número de eletrodos usados no teste. POLDER (2001), afirma que os testes para medições de RE devem ser efetuados com corrente alternada, não sendo recomendada a utilização de corrente contínua, principalmente em concreto, a fim de evitar o efeito de polarização dos eletrodos, podendo causar erros de leitura dos dados se não forem corrigidos.

Segundo ESBACH e SOUDERS (1975), a resistividade elétrica e a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção constante quando exposto a uma corrente contínua e uniformemente distribuída.

POLDER (2001) conceitua resistividade elétrica como uma propriedade que descreve a resistência elétrica relacionada entre uma voltagem e a corrente resultante em uma pilha elétrica unitária, e aponta uma baixa resistividade as estruturas com alto risco de corrosão. De acordo com SENGUL e GJORV (2008), e WHITING, NAGI, (2003), uma alta resistividade elétrica permite indiretamente avaliar a penetração de íons cloreto no concreto. Em concordância POLDER e PEELEN (2002), constataram que à medida que a

resistividade do concreto aumenta, o coeficiente de difusão de cloretos no concreto diminui, obtendo assim uma relação inversamente proporcional. Ainda RAMEZANIANPOUR et al., (2011), afirmam que a resistividade elétrica pode determinar a permeabilidade de íons cloreto no concreto, porém não há nenhuma relação com a resistência à compressão do concreto.

GJORV et al., (1977), afirma que quando a camada de proteção das armaduras está destruída, a intensidade de corrosão é controlada pela resistividade elétrica do concreto e pela variação de oxigênio no interior do concreto.

SENGUL e GJORV (2009) definem resistividade elétrica como a resistência do concreto contra a passagem de corrente elétrica através dos íons encontrados nos fluidos dos poros deste material.

ANDRADE (2010), afirmou que a resistividade elétrica pode ser entendida como uma indicação da microestrutura do concreto, a fim de dimensionar a durabilidade, ou como um parâmetro para estimar a vida útil de serviço do material.

A resistividade do concreto é uma propriedade muito sensível, portanto, assim como outras propriedades já vistas, depende de alguns fatores que influenciam no seu comportamento, bem como relação água/cimento, período de cura, grau de hidratação, composição do material, tipo e teor de adições minerais utilizadas e a temperatura. As dimensões também interferem nas medições de resistividade, pois quanto maior o seu comprimento e menor a seção transversa do material, maior será a intensidade elétrica através do material. POLDER (2001), afirma que a resistividade do concreto pode variar de  $10 \Omega.m$  a  $10^5 \Omega.m$ , dependendo dos materiais que compõe o concreto, verifica-se também que a relação água/cimento é inversamente proporcional a resistividade elétrica do concreto, onde o período de cura e o uso de adições também exercem considerável influência nesta propriedade.

SAFIUDDIN, WEST e ALONSO (2010), constataram que a elevada resistividade do concreto está relacionada com a porosidade total do material. CHAO-LUNG, ANN-TUAN E CHUN-TSUN (2011), também verificaram o

aumento da resistividade elétrica com a diminuição do volume de poros capilares e do aumento da impermeabilidade do concreto.

Em relação a ação da temperatura sobre a resistividade do concreto, POLDER (2001), verificou que eles possuem uma relação inversamente proporcional, ou seja, quando do aumento da temperatura, ocorre a diminuição da resistividade, devido a influência da temperatura na mobilidade dos íons e interações entre os íons nos poros do concreto.

Pode-se perceber que assim como outras em propriedades, a durabilidade do concreto em relação a resistividade elétrica, depende de vários fatores como os que foram mostrados anteriormente. Além destes, é preciso ressaltar também a grande influência que a água exerce sobre a resistividade elétrica do concreto, uma vez que, dependendo da relação água/cimento utilizada na mistura e do tipo de exposição da estrutura ao meio ambiente e seus ciclos de molhagem, o risco do processo de corrosão da armadura poderá ser amplificado de forma relevante.

Para WHITING (2003), a resistividade está diretamente relacionada a permeabilidade de fluidos e a difusividade de íons através de materiais porosos como no caso do concreto. O autor considera

Com relação ao uso de agregados WHITING e NAGI (2003), constataram que os efeitos dos agregados na resistividade do concreto são de grande relevância. Estes autores constataram que apesar da resistividade ser regida principalmente pela pasta cimentícia, o tipo e a quantidade de agregado utilizado alteram consideravelmente a resistividade do concreto. Da mesma forma, de acordo com o trabalho de PRINCIGALLO et al., (2003), a condutividade elétrica do concreto pode ser alterada com a modificação no teor de agregados na composição do concreto. No trabalho destes autores foi constatado que na medida em que se aumentava o teor de agregados de 10% a 75%, ocorreu também o aumento na resistividade elétrica. A figura 04 a seguir, mostra a diferença no grau de resistividade de pastas com diferentes tipos de cimentos.

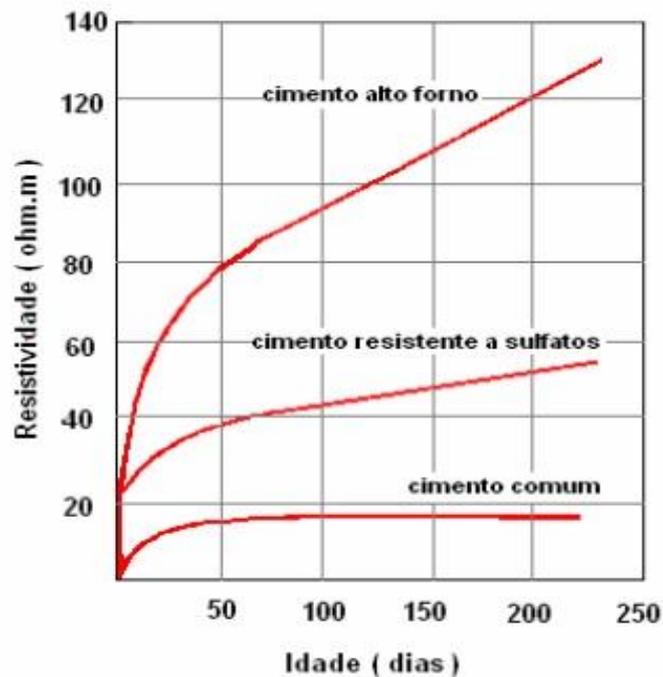


Figura 4 - Resistividade elétrica em pastas com diferentes tipos de cimentos, a temperatura de 22°C e umidade relativa de 100% (HANSSON E HANSSON, 1983).

NEVILLE (1997), afirma que mudanças na composição química do cimento altera consideravelmente a resistividade elétrica do concreto, uma vez que altera a concentração de íons presentes na água livre nos poros do concreto. WHITING (2003), também confirma que a mudança no teor de cimento define o volume de pasta de cimento no concreto, logo a composição química do cimento através do teor de álcalis e  $C_3A$  causará uma mudança na resistividade do concreto. Ainda sobre o trabalho, o autor afirma que cimentos com alta quantidade de alumina apresentaram menor resistividade elétrica que os concretos de referência. Cimentos com alto e baixo teor de  $C_3A$  apresentaram comportamento semelhante, porém nas idades iniciais a resistividade foi maior e decrescendo ao longo do tempo até chegar a estabilização da resistividade. De acordo com a figura 05, ainda foi constatado que misturas com consumo de cimento maior apresentaram resistividade maior, mesmo com relações água/cimento diferentes.

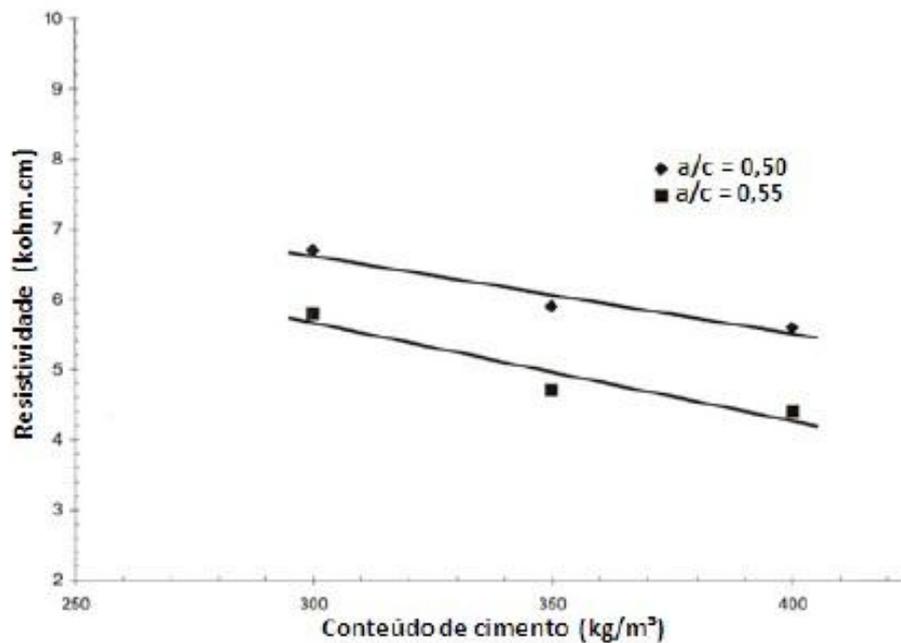
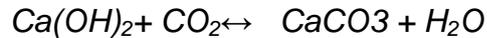


Figura 5 - Resistividade elétrica em função do consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto (WHITING e NAGI, 2003).

#### 3.2.2.4.2. Carbonatação

A carbonatação consiste na reação química do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que está presente na atmosfera com agentes minerais resultantes da hidratação do cimento, sendo que esta reação ocorre seguindo condições higrométricas. Este fenômeno por si só não provoca a deterioração do concreto, porém, os seus efeitos em conjunto com a penetração de cloretos se tornam os principais responsáveis pela despassivação das armaduras (FERREIRA, 2000).

No ar atmosférico encontra-se dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que quando em contato com água presente nos poros dos concretos e minerais provenientes da pasta de cimento sofre uma reação química, tendo como produto o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), tendo em vista que a simples presença do  $\text{CO}_2$  não causa danos ao concreto. A equação a seguir mostra a reação química que ocorre no processo de carbonatação:



A carbonatação tem como reação básica a combinação do  $\text{CO}_2$  com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  devido a velocidade com que essa reação ocorre, sendo esta a reação a reação mais rápida entre os elementos carbonatáveis do concreto, uma vez que o  $\text{CO}_2$  reage três vezes mais rápido com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do que com CSH, vinte vezes mais rápido do que a reação com  $\text{C}_2\text{S}$  e cinquenta vezes mais rápido do que sua reação com o  $\text{C}_3\text{S}$  (PETER et al., 2008).

A primeira equação ocorre em presença de água liberando acidez no concreto, já a segunda equação ocorre em decorrência da reação do  $\text{CO}_2$  na presença de minerais da hidratação do cimento  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , tendo como produto carbonatos, advindo daí o nome carbonatação. O principal efeito negativo da carbonatação é a destruição da película apassivadora da armadura dentro do concreto. Quando da ocorrência da carbonatação há também a diminuição do pH da umidade presente nos poros do concreto para valores próximo de 9, enquanto antes eram de 13. Quando a carbonatação está em estágio avançado os valores do pH da água ficam em torno de 8,5 (VIEIRA, 2013). A diminuição do pH, destrói a camada de óxido presente sobre as armaduras formada pela pasta de cimento, destruindo assim esta proteção das armaduras chamada de passivação, possibilitando o ataque mais efetivo de agentes químicos externos.

Segundo WERLE (2010), a carbonatação é dependente de alguns fatores como a concentração de  $\text{CO}_2$ , percentual de umidade encontrado no ar e nos poros do concreto, temperatura interna do concreto, e ainda das características do concreto como tipo de cimento utilizado adições, tipos de agregados e cura do concreto. Sendo que o fenômeno da carbonatação também depende de outros fatores como composição das misturas e estrutura dos poros do concreto (CASTELLOTE et al., 2008). Estas reações para que ocorram precisam estar em presença de água e oxigênio (NEVILLE, 2002).

Quando a produção do concreto é feita com resíduos de construção e demolição, as propriedades dos agregados reciclados exercem grande importância na mistura, devido este material apresentar características peculiares sendo mais uma variável que requer estudos mais profundos para o perfeito entendimento do fenômeno da carbonatação. A seguir na figura 06, é mostrado o grau de carbonatação o concreto em profundidade (mm) para diferentes condições de temperatura e umidade durante 16 anos.

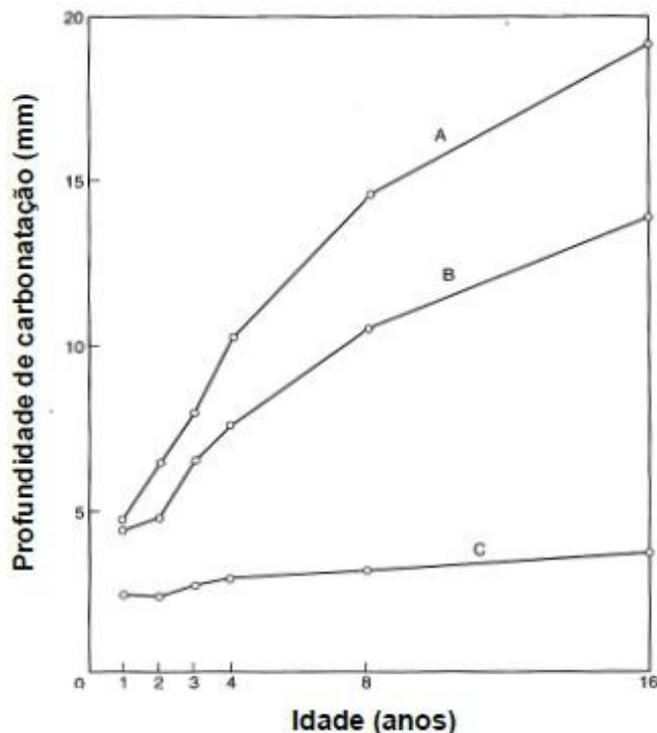


Figura 6 - Processo de carbonatação em diferentes condições (A) 200 C e 65% de umidade relativa, (B) ambiente externo protegido por telhado, (C) ambiente externo sem proteção na Alemanha. Estes valores são médias de concretos com relação a/c de 0,40, 0,60 e 0,80 com cura úmida por 7 dias (NEVILLE, 2002).

LEVY (2001) realizou um extenso estudo acerca da durabilidade de concreto com agregado reciclado, com enfoque relevante sobre a carbonatação. Onde foi estabelecida na figura 06, uma classificação dos concretos de acordo com a profundidade de carbonatação, logo esta tabela mostra uma avaliação de qualidade dos concretos sujeitos aos ensaios acelerados de carbonatação, permitindo estabelecer uma relação de tempo entre as condições da câmara e a exposição na atmosfera, onde 4 semanas equivalem de 2,5 a 3,5 anos na atmosfera com umidade relativa entre 60 e

80% e temperatura média de 25°C. NEVILLE (1997), afirma que a umidade mais favorável para a ocorrência da carbonatação está entre 70 e 80%.

Classificação do Betão	Profundidade de carbonatação (mm)			$f_{ck28}$ (MPa)
	4 anos	9 anos	16 anos	Classes de
Durável	$\leq 6$	$\leq 9$	$\leq 12$	$> 35$
Normal	6 a 12	9 a 18	12 a 24	20 a 35
Deficiente	$\geq 12$	$\geq 18$	$\geq 24$	$< 20$

Tabela 6 - Classificação de concretos em relação a profundidade de carbonatação (Levy, 2001).

Foi observado por LEVY (2001), neste trabalho que há uma relação linear entre a profundidade de carbonatação e a relação água/cimento para todas as misturas realizadas. Constatou também que para concretos de 20 e 30 MPa, a profundidade de carbonatação aos 28 dias foi menor para os concretos com agregado miúdo reciclado cerâmico em relação ao concreto convencional. Ainda assim, para os concretos de 40 MPa a diferença de profundidade de carbonatação entre os concretos com agregado miúdo reciclado cerâmico e o concreto convencional foi de menor proporção.

É possível perceber que à medida que se reduz a relação água/cimento, assim como a quantidade de agregado reciclado, passam a exercer influência cada vez menor na profundidade de carbonatação, passando a ser mais influente a qualidade da pasta sobre a carbonatação. LEVY (2001), ainda afirma que estes resultados podem ser um pouco enganadores, por levar ao entendimento de que a utilização de agregados miúdos reciclados cerâmicos é recomendada para concretos resistentes a carbonatação. Porém, para conseguir um concreto de 30 MPa utilizando agregado miúdo reciclado cerâmico, seria necessária uma dosagem com consumo de cimento acima de 500 kg/m<sup>3</sup>, logo com essa dosagem qualquer concreto seria resistente a carbonatação.

A seguir, é apresentada na figura 07 do trabalho de LEVY (2001), mostra como ocorreu a interação entre profundidade de carbonatação em relação à taxa de substituição e as faixas de resistência dos concretos.

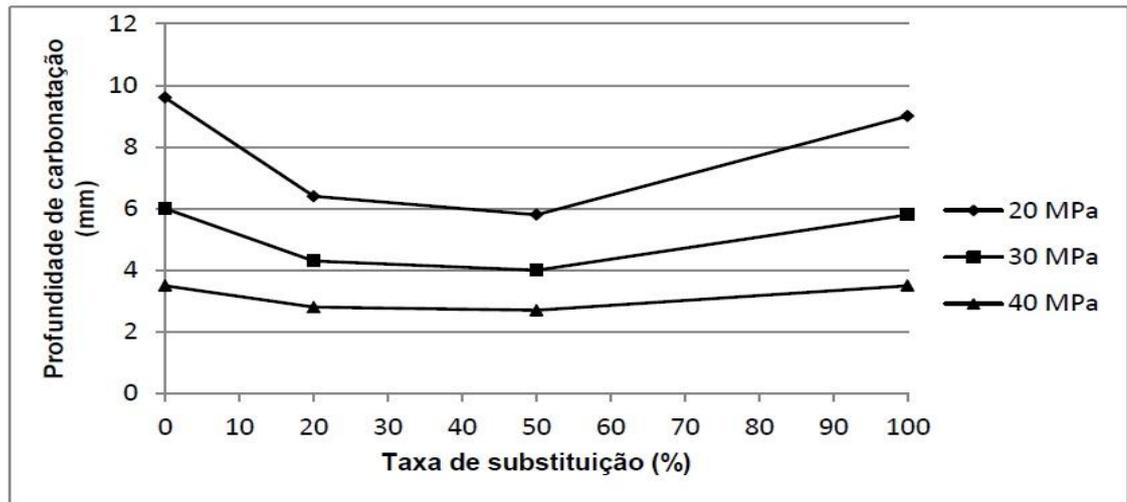


Figura 7 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição para três faixas de resistência dos concretos produzidos (LEVY, 2001).

#### 3.2.2.4.3. Penetração de Íons Cloreto

De acordo com CRAUSS (2010), a contaminação do concreto por íons cloreto, pode se dar na contaminação dos componentes do concreto como os agregados, aditivos que contenham cloretos em sua composição e a água. Muitas vezes são provenientes do próprio meio ambiente, brisas marítimas e água do mar, em contato com poluição industrial entre outros produtos agressivos. Os cloretos podem ser encontrados no concreto em várias formas, podem ser encontrados combinados quimicamente ao CSH ou como cloroaluminatos (*sal de Friedel*), adsorvidos as paredes dos poros, ou livres na água presente nos poros. Somente os cloretos livres são capazes de despassivar e corroer as armaduras do concreto, porém em condições de elevada temperatura ou quando do desencadeamento da carbonatação os cloretos combinados antes não disponíveis podem se tornar livres para atuar no processo de corrosão. Por isso é preciso levar em consideração não apenas os cloretos livres, mas também os combinados na estrutura do concreto.

De acordo com LINDVALL (2007), ainda é preciso levar em consideração a interação do concreto com o meio ambiente, pois para se obter um processo de corrosão continua é necessário dispor de uma quantidade suficiente de oxigênio para permitir a ocorrência da oxidação. Além de afirmar inadequada a avaliação comparativa de penetração de cloretos de diferentes

concretos produzidos em locais diferentes, uma vez que, o tipo de exposição ao meio ambiente interfere significativamente no resultado.

Segundo WEE et al., (2000), a ação causada pelos íons cloretos é a principal causa da deterioração das estruturas de concreto. Tal fato, se justifica devido os cloretos poderem danificar as armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade da solução dos poros, visto que tais íons não são consumidos no processo de corrosão, e permanecem disponíveis para novas reações, portanto, diferente do ataque por CO<sub>2</sub> ou soluções ácidas. Em reciprocidade a esta afirmação HELENE (1986), afirma que pequenas quantidades de íons cloretos podem provocar grande quantidade de corrosão nas armaduras.

A seguir são mostradas as reações simplificadas de corrosão por íons cloretos:



Como já foi visto, o íon cloreto participa da reação como catalisador para formar o óxido expansivo, sendo liberado para novas reações, potencializando a corrosão da estrutura. A corrosão causada por íons cloreto geralmente causa microfissuras no cobrimento das armaduras, expondo ainda mais a estrutura de concreto a entrada de agentes agressivos, chegando a causar destacamento do concreto de cobrimento das armaduras (AITCIN, 2000). Dentre os vários tipos de íons que atacam a armadura provocando corrosão, os mais problemáticos são os íons cloreto quanto ao período de iniciação e propagação da corrosão (ANDRADE, 1993).

Com relação a utilização da cerâmica no concreto e sua influência na penetração por cloretos, LEVY (2001), realizou um estudo acerca da resistência a penetração de cloretos de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. Onde encontrou uma melhora de até 30% na resistência a penetração de cloretos para os concretos com agregado reciclado cerâmico.

ANDRADE (1993), diz que por apresentar uma estrutura porosa, o concreto, não apresenta uma proteção perfeita contra a penetração de agentes agressivos, desencadeadores e propagadores de corrosão. Este fato leva a

concluir que, o processo de corrosão iniciará naturalmente com o tempo e dará início ao processo de corrosão da armadura. Pode se dizer então que os poros são responsáveis pela entrada de água e dos íons cloretos na estrutura do concreto. CASCUDO (1997), afirma que a velocidade das reações por íons cloretos pode ser aumentada consideravelmente quando houver aumento da temperatura. Podendo aumentar duas vezes a velocidade de reação quando aumentado em 10°C à temperatura.

Segundo FEDUMENTI (2013), quando o concreto for denso e bem compacto, ou seja, com taxa de porosidade bem reduzida, a ocorrência da penetração de cloretos será regida pelo mecanismo de difusão. Quando o concreto apresentar poros maiores e com maior volume, ou apresentando fissuras o mecanismo predominante será a absorção capilar.

Sabendo que os íons cloreto combinados no concreto podem se tornar ativos no processo de corrosão, dentro de algumas condições, algumas normas e pesquisas tem determinado o teor limite de cloretos presente no concreto, em porcentagem em relação a massa de cimento. Muito embora não se tenha um consenso geral em relação ao teor ótimo de cloreto para gerar a corrosão, já existem normas prevendo esses teores em alguns países. A seguir na tabela 07, são apresentadas as normas e seus valores de teor de cloretos.

Tabela 7- Limite das normas para teor máximo de cloreto em concreto.

Norma	País	Ano	Teor Limite de Cloretos no concreto % sobre a massa de cimento
ACI 318	USA	2005	0,06 (concreto protendido) 0,15 (concreto reforçado que em serviço estará exposto aos cloretos) 1,00 (concreto reforçado que em serviço estará seco ou protegido contra umidade) 0,30 (outras construções de concreto reforçado)
NP EM 206 - 1	PORTUGAL	2007	0,10 (concreto simples) 0,20 - 0,40 (concreto com armadura de aço ou outros metais) 0,10 - 0,20 (concreto com aço de pré esforço)
BS 8110 - 1	INGLATERRA	1985	0,4
ABNT NBR 12655	BRASIL	2006	0,05 (concreto protendido) 0,15 (concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura) 0,40 (concreto armado em condição de exposição não severas) 0,30 (outros tipos de construção com concreto armado)

Como se pode observar, não existe um consenso com relação ao valor padrão do teor limite de cloretos em concreto. Isto se deve principalmente aos diferentes ambientes a que são submetidos os concretos de diferentes locais, onde o meio ambiente exerce significativa influencia na penetração de cloretos.

#### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para produção do concreto com a utilização de agregados reciclados cerâmicos, foi necessário assegurar que os procedimentos fossem executados de forma sistemática, a fim de que, os dados fossem da melhor forma possível confiáveis, para isso foram estabelecidas estas etapas:

- Definição de variáveis de controle e número de corpos de prova necessários para obtenção dos resultados e objetivos propostos.

- Seleção e caracterização dos materiais segundo as normas. Foi dada atenção especial para a produção e caracterização dos agregados de resíduos cerâmicos, uma vez que, o estudo da influência deste material na durabilidade do concreto é o principal objetivo deste trabalho.

- Definição do processo de dosagem de traços.

- Realização das misturas e execução dos ensaios de resistência: compressão axial, a qual foi determinada conforme as respectivas normas NBR 5739 (ABNT, 2007); e ensaios de durabilidade: Carbonatação acelerada, absorção por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 1995), Penetração de Cloretos (ASTM C1202) e Resistividade Elétrica (ASTM G 57) e análise de resultados. O programa experimental foi desenvolvido no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

##### 4.1. PLANEJAMENTOS DOS ENSAIOS

A seguir, para o perfeito desenvolvimento do trabalho e também assegurar a confiabilidade dos dados que foram obtidos na pesquisa foi necessário a definição de algumas variáveis de controle que foram fundamentais para este trabalho:

- **Relação a/c:** serão adotados valores de 0,45, 0,55, 0,65. Estes valores de relação a/c foram escolhidos porque abordam as resistências mais usuais adotadas na região metropolitana de Belém.

- **Teores de substituição:** foram adotados percentuais de 0%, 12,5% e 25% para o intervalo de substituição em massa dos agregados miúdos naturais (AMN) pelos agregados miúdos de cerâmica vermelha (AMC).
- **Teores de Compensação:** as taxas de compensação da absorção de água dos agregados reciclados variaram de 40, 60 e 80% para os traços e suas misturas.
- **Idades:** as idades de 28 e 63 dias foram utilizadas nos ensaios de resistência à compressão axial, absorção por capilaridade, resistividade elétrica por ser usualmente utilizada para avaliação em concreto. A idade de 63 e 91 dias foi utilizada para os ensaios de penetração de cloretos e 91 dias para o ensaio de carbonatação. Sendo que, as idades de 63 e 91 dias, foram utilizadas devido a possibilidade do material cerâmico apresentar atividade pozolânica e assim verificar em idades posteriores a ocorrência deste evento.

Tendo definidas as variáveis de controle, foram definidas também as variáveis de resposta, obtidas através dos ensaios realizados na fase endurecida do concreto:

- Absorção por Capilaridade;
- Penetração de Íons Cloreto;
- Resistividade Elétrica;
- Carbonatação acelerada;
- Trabalhabilidade.

Com relação a trabalhabilidade tomou-se em consideração a mudança no comportamento do concreto pela utilização do agregado miúdo cerâmico, o que influenciou diretamente no abatimento. Para esta avaliação utilizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, o qual foi pré-definido em  $80 \pm 20$  mm como padrão para alcance em todas as misturas.

O estudo do comportamento do concreto com o agregado cerâmico reciclado tratará de algumas variáveis e o modo como essas variáveis se

relacionam entre si. Logo, essas variáveis também serão analisadas levando em consideração as interações que ocorrem entre as mesmas. Para isso será utilizado software de estatística para análise (ANOVA).

#### 4.2. AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

##### ➤ Água

Foi utilizada a água que abastece o campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), proveniente da rede pública.

##### ➤ Cimento Portland:

O cimento utilizado foi o cimento CP V - ARI (Cimento Portland Pozolânico de Alta Resistência Inicial) fabricado nacionalmente em conformidade com a NBR 5733 (ABNT,1991).Essa escolha se deu por não apresentar adições minerais, logo, evitar confundir o efeito pozolânico advindo do cimento, com o efeito pozolânico pelo AMC, uma vez que, alguns autores apontam para a ocorrência deste efeito. As especificações foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se nas tabelas 8 e 9, a seguir.

Tabela 8– Características físicas e mecânicas do CP V ARI.

Características	Dados do fabricante
Massa específica	3,12 g/cm <sup>3</sup>
Finura Blaine	4687 cm <sup>2</sup> /g
Retido #200	0,20%
Retido # 325	3,40%
Tempo de pega (início)	130 min
Tempo de pega (fim)	210 min
Resistência a compressão (1dia)	27,7 MPa
Resistência a compressão (3 dias)	42 MPa
Resistência a compressão (7 dias)	46,7 MPa
Resistência a compressão (28 dias)	51,1 MPa

Tabela 9– Características químicas do CP V ARI.

Composição química	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	PF
Amostra (%)	64,03	19,65	4,99	3,17	2,56	0,83	0,69	3,61

➤ Agregado Miúdo

A areia utilizada foi obtida de jazida proveniente do município de Ourém no Pará, foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária segundo as normas NBR 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2003); respectivamente.

Tabela 10- Características do agregado miúdo

<b>AGREGADO MIÚDO NATURAL</b>				
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
4,8	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
2,4	4	0	0	
1,2	12	1	1	
0,6	54	5	6	
0,3	516	52	58	
0,15	296	30	88	
<0,075	118	12	100	
	1000	100	-	
Massa Específica		2,64 kg/dm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária		1,17 kg/dm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		1,53		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		1,2 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de vazios		55%		ABNT NBR NM 45 (2006)

➤ Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita granítica oriunda da cidade de Traquateua, estado do Pará. Foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa unitária, massa específica de acordo as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2003) e NBR NM 53 (2009), respectivamente.

Tabela 11 - Características do agregado graúdo.

AGREGADO GRAÚDO NATURAL (BRITA)				
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
38	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
25	0	0	0	
19	54	5	5	
12,5	511	51	56	
9,5	349	35	91	
4,8	86	9	100	
Fundo	0	0	100	
	1000	100	-	
Massa Específica		2,95 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária		1,39 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		2,52		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		19 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de vazios		53%		ABNT NBR NM 45 (2006)

A seguir, na figura 08 tem-se a curva granulométrica da brita utilizada.

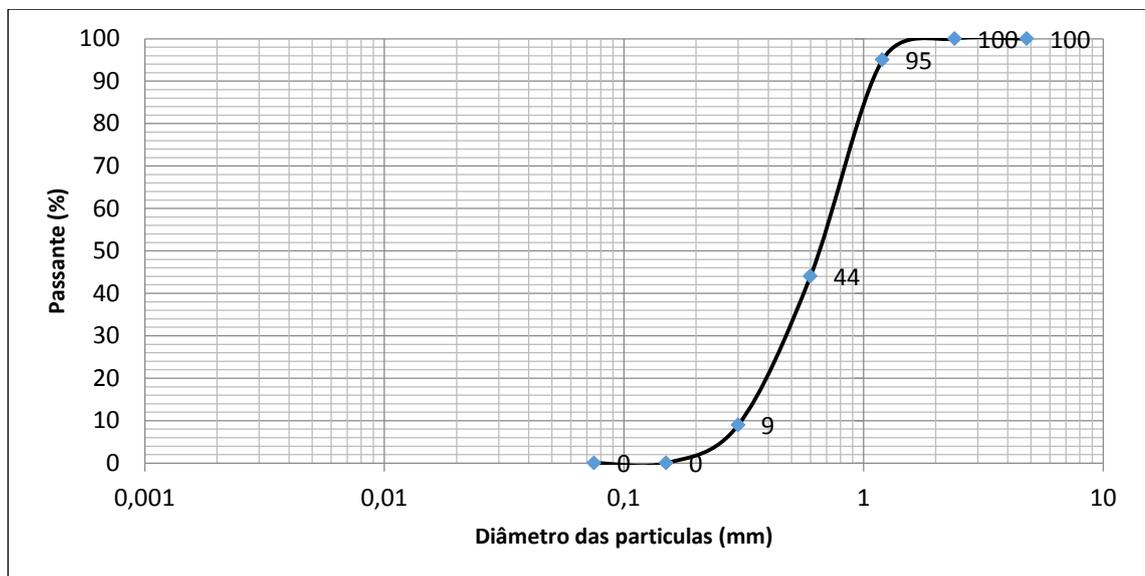


Figura 8 - Curva granulométrica da brita.

### ➤ Agregados Reciclados

Os agregados reciclados que foram utilizados na produção dos concretos experimentais com RCC foram coletados de uma distribuidora e

revendedora de materiais de construção localizada na cidade de Belém. Para produção dos concretos foi necessário fazer o beneficiamento do material cerâmico, sendo que este beneficiamento se constitui de britagem e peneiramento e em seguida foi feita a caracterização do material beneficiado. Então para a produção e beneficiamento do agregado miúdo reciclado foram executadas as seguintes etapas:

a) Britagem

Ressalta-se que para este trabalho e em alguns outros trabalhos realizados nesta instituição, a britagem dos agregados reciclados era feita em britador de mandíbula. Porém, por ser um processo adaptado, não havia controle nem da forma e nem do diâmetro máximo do agregado produzido, sendo necessário um segundo processo de quebra manual e peneiramento, o que dificultava o processo. Desta forma, decidiu-se fazer o beneficiamento de britagem por quebra na máquina de abrasão, onde o material cerâmico foi quebrado para entrada na máquina de abrasão Los Angeles, e submetidos a quebra por abrasão nos períodos de 5, 10, 15, 20, 30 e 45 minutos, onde a cada tempo era observado a qualidade do material produzido. Aos 30 minutos foi observado que praticamente 50% do material produzido era passante na peneira 4,8mm, e com boa uniformidade, porém, para obtenção de uma maior quantidade de material de fração miúda e melhor aproveitamento do material, foi feito a quebra por abrasão por mais 15 minutos. Após esta britagem foi feito o peneiramento do material, e também separado as frações graúdas e miúdas do agregado cerâmico produzido, sendo utilizada somente a fração miúda para este trabalho.



Figura 9 - Máquina de abrasão Los Angeles.

### b) Peneiramento

Após britagem foi realizado o processo de peneiramento para obtenção da faixa granulométrica que passa pela peneira de malha # 4,8mm; conforme NBR NM 248 (ABNT,2003), seguindo os mesmos critérios adotados para os agregados convencionais.

### c) Caracterização do Agregado Reciclado Miúdo Cerâmico

Foram realizados ensaios de composição granulométrica NBR 248 (ABNT, 2003), massa unitária ABNT NBR NM 45 (2003). Para a determinação da massa específica do agregado miúdo cerâmico foi utilizada a NBR NM 23 (ABNT, 2001), pois não foi possível realizar o procedimento com o frasco de Chapman, devido à alta finura e porosidade do material cerâmico, impossibilitando a execução do ensaio.

Tabela 12 - Características do agregado miúdo reciclado

<b>AGREGADO MIÚDO CERÂMICO</b>				
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
4,8	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
2,4	0	0	0	
1,2	22	2	2	
0,6	92	9	11	
0,3	417	42	53	
0,15	273	27	80	
<0,075	196	20	100	
	1000	100	-	
Massa Específica		2,55 kg/dm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 23 (2000)
Massa Unitária		1,14kg/dm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		1,46		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		1,2 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de vazios		55%		ABNT NBR NM 45 (2006)

A seguir na figura 10 tem-se as curvas granulométricas da areia e do agregado miúdo reciclado cerâmico (AMRC).

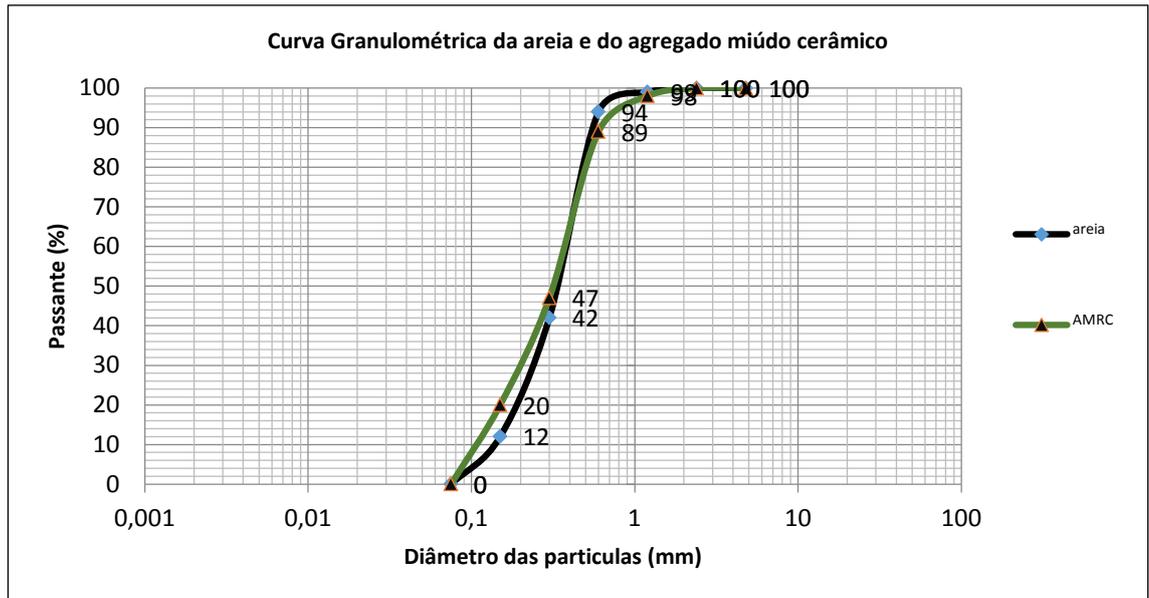


Figura 10- Curva granulométrica da areia e do AMC.

Além disto, foram realizados ensaios para determinação da absorção dos agregados reciclados. Apesar de haver uma norma específica para definir a absorção do agregado miúdo, adotou-se método o proposto por LEITE et al (2011), que foi modificado para estabelecer o grau de absorção do agregado miúdo reciclado cerâmico, tendo em vista a alta porosidade e absorção deste material.

O processo está descrito a seguir:

1. Os agregados reciclados cerâmicos miúdos (AGRC) foram secos em estufa e colocados no recipiente. Foi utilizada uma peneira de 0,075mm onde na tampa e no fundo foram colocados um material de malha fina (seda), com a intenção de evitar a perda dos finos do material cerâmico e proporcionar a passagem de água.

2. Após isso, foram submersos em água e monitorado o ganho de massa do material submerso com o auxílio de uma balança dotada de um dispositivo para medida hidrostática do ganho de massa com precisão de 0,1 g. Antes de cada leitura, o recipiente foi agitado cuidadosamente para facilitar a saída do ar presente na amostra.

3. Este procedimento de monitoramento do ganho de massa do material foi realizado em um período de 24 horas.

- Sendo que nos 10 primeiros minutos foi realizada uma leitura a cada minuto; devido a absorção do agregado miúdo reciclado se dar de forma muito rápida nos primeiros minutos;
- Entre 10 e 30 minutos uma leitura a cada 5 minutos;
- Entre 30 minutos e 1 hora foi feito uma leitura a cada 10 minutos;
- Entre 1 e 2 horas, uma leitura a cada 15 minutos;
- A partir das 2 horas foi feito uma leitura a cada hora até que se completassem 9 horas depois do instante inicial. E por último, foi realizada uma leitura após 24 horas da colocação da amostra em água.

Então se obteve a curva de absorção em ganho de massa do material, em função do tempo, mostrado na figura 11 a seguir. Com isso, foi possível determinar a quantidade de água a ser compensada na mistura e o tempo para a realização da pré-molhagem.

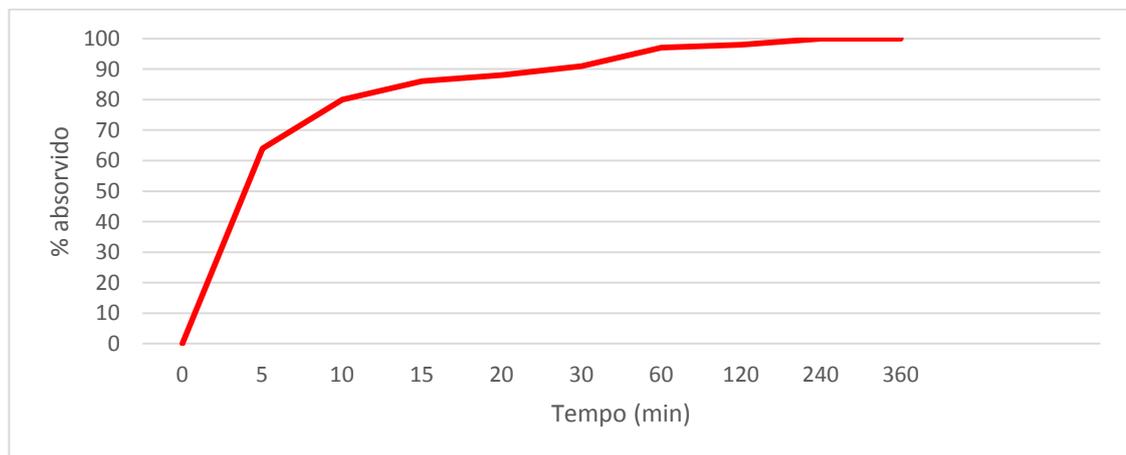


Figura 11 – Gráfico de absorção do agregado miúdo reciclado cerâmico em relação ao tempo.

Na figura 11, está apresentada a curva de absorção do agregado miúdo cerâmico. Através da curva foi visto que mais de 80% da massa de água foi absorvida até os 10 primeiros minutos. De acordo com, ALVES et al. (2014) mais de 80% da absorção do agregado cerâmico também ocorreram nos

primeiros 10 minutos. Devido à grande taxa de absorção do agregado cerâmico, foi estabelecido que estes teriam suas taxas de absorção compensadas nas misturas através da pré-molhagem do AMC, conforme colocado no item 4.1.

LEITE (2001), afirma que compensar parcialmente a taxa de absorção do agregado miúdo, permite que não haja um excesso de água no concreto, o que acarretaria em grandes perdas de resistência. De acordo com a autora, para agregados reciclados com elevada porosidade, compensar parcialmente a absorção do agregado reciclado pode ser considerado mais que suficiente, pois não haveria risco de diminuição excessiva da relação água/cimento pela absorção do agregado reciclado e nem o risco de tornar o concreto demasiadamente fluido. NEVILLE (1995) afirma ainda, que quando há a saturação do agregado reciclado, na mistura pode ocorrer a liberação de água deste para a mistura. Tal fato pode ocasionar grandes perdas nas propriedades do concreto.

#### 4.3. DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem utilizada na confecção das misturas experimentais foi baseada no Método desenvolvido pelo IPT/USP (HELENE e TERZIAN, 1993). Onde foi previsto o abatimento de  $(80 \pm 20 \text{ mm})$  como parâmetro de padronização da trabalhabilidade das misturas. Através deste método foi definido um teor ideal de argamassa de 53% na análise de um traço intermediário 1:5 em massa. De acordo com o traço intermediário foram produzidos traços rico (1:3,5) e pobre (1:6,5); todos respeitando o abatimento e o teor de argamassa do traço intermediário. Com a obtenção das informações dos 3 traços foram formuladas curvas de correlação entre os materiais secos “ms” (agregados graúdos e miúdos), relação água cimento “a/c” e o consumo de cimento “C” todos mostrados na figura 12.

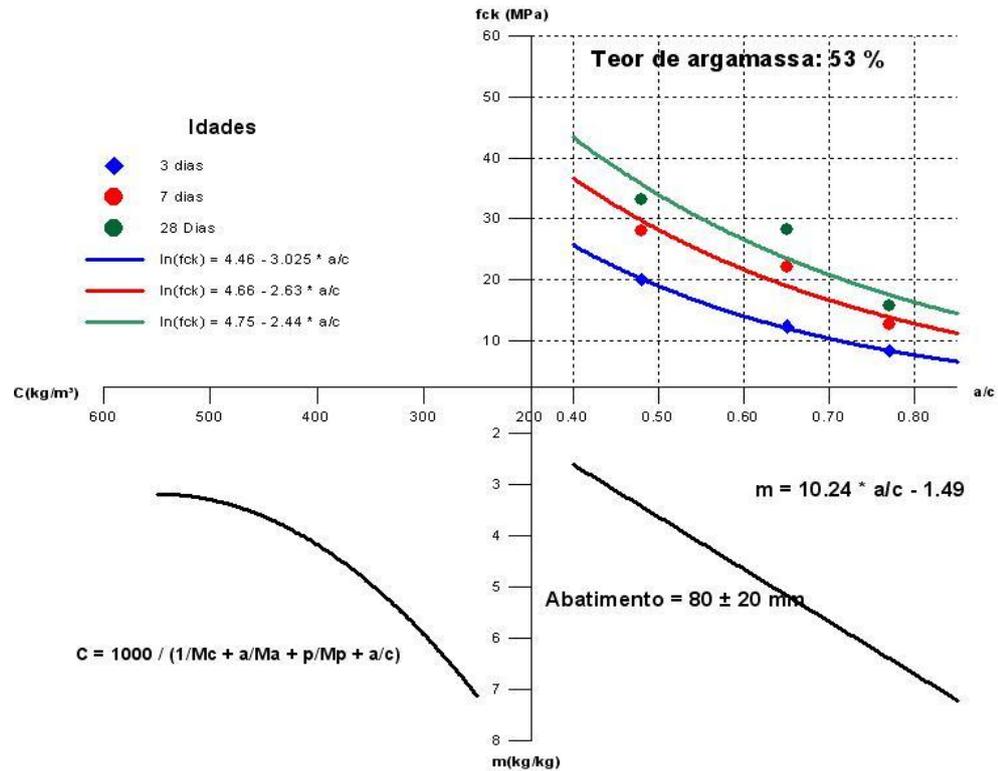


Figura 12 - Gráfico referência de dosagem IPT/USP.

A partir do gráfico de dosagem, partiu-se então para definição dos traços de referência através das relações água/cimento definidas no item 4.1. A seguir, é mostrado na tabela 13 as quantidades de materiais utilizados para cada tipo de mistura, em quilos.

Tabela 13- Quantidade de material utilizado por traço.

Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	a/c	Consumo de cimento/m <sup>3</sup>
1	2,28	2,92	0,65	339,26
1	1,74	2,43	0,55	406,73
1	1,16	1,91	0,45	517,26

Apesar da diferença das massas específicas entre agregados miúdos natural (areia) e reciclado (cerâmica), as dosagens foram feitas em relação a massa dos materiais (em quilos), sem qualquer ajuste com relação ao volume dos mesmos. A opção por esta forma de substituir deveu-se principalmente pela necessidade de tornar este procedimento mais prático.

#### 4.4. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

No estado fresco do concreto foi realizado o ensaio de abatimento do Tronco de Cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Em relação ao estado endurecido do concreto, conforme descrito no item 3.1.3, foram realizados ensaios que avaliaram a durabilidade do concreto com este tipo de agregado. Além do ensaio de durabilidade também foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), os concretos moldados para este ensaio foram desformados e colocados em tanques de água para cura imersa e retirados nas datas de ensaio. Este ensaio teve como objetivo verificar somente o controle do concreto entre os traços experimentais, de acordo com as relações a/c especificadas. O valor final para cada mistura é a média aritmética de 3 corpos de prova por mistura.

Com relação ao estado endurecido do concreto, foram realizados ensaios de durabilidade, tem-se a seguir uma descrição dos mesmos:

##### 4.4.1. Absorção por Capilaridade

Para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade foi seguido o prescrito segundo a norma NBR 9779 (ABNT, 1995).

Os corpos de prova foram secos em estufa até constância de massa, e então foram resfriados na temperatura ambiente para pesagem dos mesmos.

##### 4.4.2. Penetração acelerada de Íons cloreto (ASTM 1202, 2007).

Este ensaio tem como objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto (9,5 x 20 cm), o qual fornece uma indicação acelerada da resistência do concreto à penetração de íons cloretos. A sua duração é de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos, através de um amperímetro, sua execução consiste basicamente em

inserir uma amostra de concreto entre duas meia-células de acrílico, onde suas faces são expostas a uma solução de hidróxido de sódio (NaOH – 0,3N em água destilada), e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl – 3% em água destilada).

As meias células são submetidas a uma diferença de potencial de  $60 \pm 0,1V$ , originando uma corrente elétrica fazendo com que ocorra a difusão do cloreto através do concreto sob a atuação de um campo elétrico. Quando equacionado o produto da corrente pelo tempo, tem-se o resultado da carga que passa por meio do corpo de prova.

Aos 63 e 91 dias de moldagem foram submetidos ao pré condicionamento prescrito nesta norma que se dá da seguinte forma:

- Aplicação e secagem de selante (Impermeabilizante epóxi semifluido – Vedacit) na face curva externa dos corpos de prova;
- Aplicação de vácuo por um período de 3 horas;
- No dessecador onde foi aplicado o vácuo, foi introduzida água destilada até submergir as amostras e aplicado vácuo por um período de mais 1 hora;
- Imersão em água destilada por mais  $18 \pm 2$  horas;

Após o condicionamento as amostras foram secas superficialmente com cuidado, em seguida foram coladas nas células de acrílico com ajuda de cola de silicone.

Com a finalização do ensaio após 6 h, e com os dados das correntes foi calculada a carga total passante (equação), e verificados os riscos de penetração de cloretos na tabela de acordo com a norma ASTM C1202.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360})$$

Onde:

Q – Carga passante (Coulombs)

I – Corrente passante em determinado tempo (amperes)

Tabela 14 - Risco de penetração aos íons cloreto em relação a carga passante (ASTM C1202)

Carga Passante	Risco de penetração
>4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
<100	Desprezível

#### 4.4.3. Resistividade Elétrica

Para este ensaio, como não se tem procedimento normativo foi adotado o método proposto por WENNER (ASTM G 57). Esta é a técnica mais utilizada atualmente para medida de resistividade “in situ”, originalmente utilizado em solos, sendo que este método, também conhecido por Método dos Quatro Eletrodos, foi posteriormente adaptado e normatizado pela ASTM para uso em concreto. Para confecção dos corpos de prova foram utilizadas formas metálicas de dimensões (15x15x15) cm. A cura foi feita em tanque de água e cal durante o período de 63 dias, retirados apenas nas datas de 28 e 63 dias para ensaio.

Antes dos ensaios as amostras foram secas em estufas por 24 horas e depois colocadas em ambiente com temperatura e umidade controladas ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $75 \pm 3\%$ , respectivamente) por 24 horas.

A confecção dos eletrodos se deu antes do processo de moldagem dos corpos de prova, de maneira semelhante ao aplicado nos trabalhos de ROSA (2005), LUBECK (2008), CEZAR (2008) e NETO (2012), da seguinte maneira:

- Corte do fio de cobre em pedaços de 8 cm;
- Decapagem das extremidades dos fios sendo 1 cm de um lado e 2cm do outro, com 5cm restantes encapados;
- Amassamento da extremidade do eletrodo a ser introduzido no prisma (2 cm) para proporcionar maior aderência do eletrodo no concreto.

Para a aquisição de dados confiáveis, os eletrodos devem estar equidistantes e posicionados linearmente com espaçamento de 3 cm entre eles. O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada para verificar o potencial do concreto em conduzir eletricidade. É aplicada e medida a corrente entre os eletrodos externos e, entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial como mostra a figura 13 a seguir.

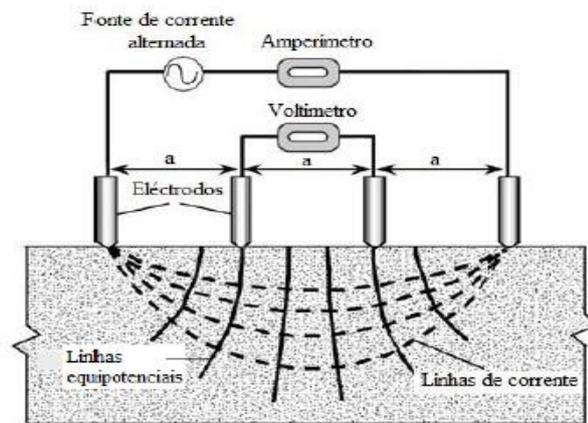


Figura 13 - Princípio de funcionamento utilizando a técnica dos 4 eletrodos (SILVA, 2012).

A média aritmética dos valores de corrente e de diferença de potencial obtido no ensaio foram aplicados na equação 06, logo, obteve-se a resistividade elétrica de cada corpo de prova.

O valor de resistividade elétrica pelo método de Wenner foi obtido através da fórmula de Medeiros Filho (1979 apud., ABREU,1998):

$$\rho = R \times K$$

$$k = \frac{4 \times \pi \times a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2+4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2+4b^2)}}$$

Onde:

P = resistividade elétrica calculada do concreto, em Ohm.m;

R = resistência média medida pelo equipamento, em Ohm.m

a = distância de separação entre os eletrodos, em metros;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em metro;

A partir dos resultados finais obtidos são feitos os critérios de avaliação do risco de corrosão, propostos pelo CEB 192 (1988), como consta na tabela 15.

Tabela 15 - Critérios de avaliação do risco de corrosão propostos pelo CEB 192 (1998).

Resistividade do Concreto	Probabilidade de Corrosão
>20000 ohm.m	Desprezível
10000 a 20000 ohm.m	Baixa
5000 a 10000 ohm.m	Alta
<5000 ohm.m	Muito Alta

#### 4.4.4. Carbonatação acelerada do concreto

Os ensaios de carbonatação no concreto foram feitos em câmara de carbonatação projetada e montada no próprio laboratório de engenharia civil da UFPA. Este trabalho foi executado usando os mesmos procedimentos adotados no trabalho de REIS (2013), onde apenas uma entrada de gás foi utilizada sem sistema de escape ou outras modificações na câmara.

Portanto, foi introduzido na câmara um volume de  $10 \pm 2\%$  de gás carbônico em relação ao volume total da câmara. É importante ressaltar que foi feito um registro da temperatura e umidade relativa do ar dentro da câmara antes de cada ensaio, com intuito de observar a influência destes sobre os resultados do ensaio. A temperatura variou entre  $27,5^{\circ}\text{C}$  e  $33^{\circ}\text{C}$ , a umidade entre 67,5% e 73%. O controle da vazão de  $\text{CO}_2$  foi feito através de um rotâmetro em litros por minuto, onde o tempo de vazão foi cronometrado até atingir a concentração desejada para o ensaio, então o fornecimento de gás era interrompido e o processo se repetia toda vez que a câmara foi aberta para retirada dos corpos de prova.

Para obtenção de uma distribuição homogênea dos gases em todo compartimento da câmara, foi utilizado um sistema de ventilação interna para

mistura do ar com o gás carbônico. Além disso, os corpos de prova foram dispostos horizontalmente em bandejas gradeadas dentro da câmara para a melhor circulação do ar.

Os corpos de prova prismáticos utilizados para os ensaios possuíam dimensões de (15x15x35) cm, 24 horas após moldagem dos corpos de prova eles foram colocados submersos em tanques de cura à temperatura constante. Após 91 dias de cura, os corpos de prova foram retirados dos tanques de cura e colocados em sala climatizada por 48 horas, até secagem superficial. Não foi feita secagem em estufa para não retirar toda a água presente nos poros do concreto.

Em cada data de ensaio de 3, 7, 14, 21 e 28 dias após colocados em câmara de carbonatação os corpos de prova foram rompidos de modo que as amostras apresentassem em torno de  $5\pm 1$  cm de espessura. O rompimento foi feito em prensa EMIC, através do esquema de corte por cisalhamento combinando de duas barras de aço. O esquema de cortes com serra elétricas não foi utilizado para evitar qualquer alteração na microestrutura do concreto e destacamento dos agregados da matriz de concreto.

Com as amostras identificadas, partiu-se para o procedimento de aspersão de fenolftaleína baseado na proposta do RILEM CPC 18 (2001), realizado a cada data de exposição ao  $\text{CO}_2$ , após rompimento na prensa. Para a composição da solução de fenolftaleína utilizou-se 70% de álcool PA, 30% de água destilada e 1% de fenolftaleína em pó.

A aplicação da solução se deu na face fraturada das amostras para identificação das áreas carbonatadas (figura 14), enquanto que, os restantes dos corpos de prova retornam para câmara de carbonatação até atingir nova data de ensaio.



Figura 14 - Amostra de corpo de prova carbonatada após aspersão de fenolftaleína.

Após aspersão de fenolftaleína, foi feito o registro fotográfico das amostras recém rompidas, e assim foi feito em cada idade após rompimento das amostras. Com a aspersão da solução ouve uma mudança de coloração (vermelho-carmim) na área do concreto onde o pH é alcalino (em torno de 13), e manteve-se incolor onde o concreto apresenta a área carbonatada, portanto, o pH baixo (em torno de 9).

Este trabalho adotou o mesmo procedimento encontrado nos trabalhos de KULAKOWSKI (2002), KIRCHHEIM (2003), PAULETTI (2004) e WERLE (2010), onde houve registro fotográfico das amostras e análise das mesmas em software específico (Auto CAD) para definição da área carbonatada.

A medição da profundidade de carbonatação seguiu os seguintes passos:

- Inserção da imagem fotografada no programa Auto CAD, e em seguida ajuste da imagem em sua dimensão real através da ferramenta *scale*;
- Depois de ajustadas as dimensões da foto, são selecionadas as áreas para análise da carbonatação (figura 15 - a); nas áreas selecionadas são traçadas 10 linhas de mesma distância e paralelas entre si (figura 15 - b), para a análise detalhada da frente de carbonatação;

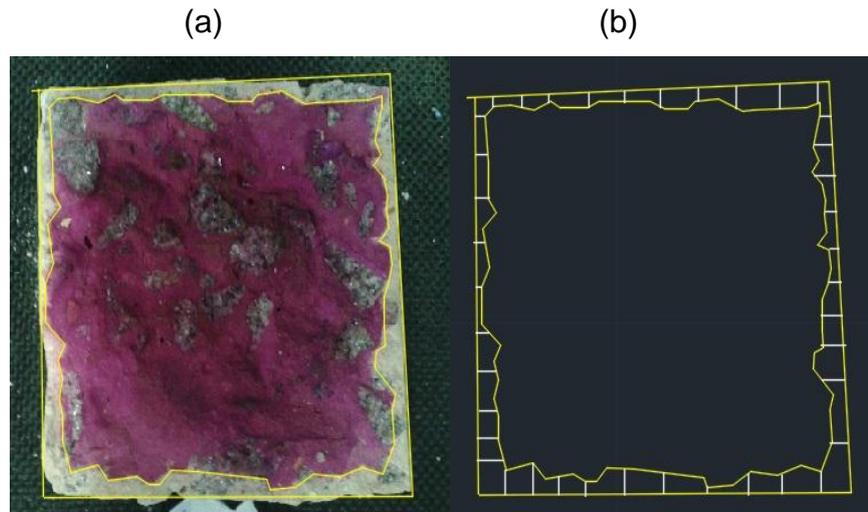


Figura 15 - Seleção da área a ser estudada.

- Logo, são obtidas 120 medidas de profundidade de carbonatação para cada traço, sendo que foram utilizados 3 corpos de prova por traço. (3 corpos de prova x 10 medidas de cada face).
- Então foi feita a média da profundidade de cada face, em seguida, a média de cada amostra e por último a média entre as três amostras.

#### 4.5. PRODUÇÃO DAS MISTURAS E CORPOS DE PROVA.

Para a produção das misturas e dos corpos de prova, foi feita a compensação da água nos agregados miúdos reciclados, que foi realizada antes do processo de amassamento dos concretos experimentais, através da pré-molhagem (PM) destes agregados. A pré-molhagem foi feita com a finalidade de evitar a alta absorção de água de amassamento pelos agregados miúdos reciclados, o que afeta diretamente a trabalhabilidade do concreto e o processo de hidratação do cimento.

NEVILLE (1995), afirma que a absorção dos agregados reciclados é interrompida ou se torna mais lenta quando, as partículas encontram-se revestidos pela pasta de cimento, quando estes são misturados na betoneira, contribuindo assim para que não haja na prática, absorção total dos agregados reciclados. Tendo em vista o fato citado, para o processo das misturas dos concretos com agregado miúdo cerâmico foi adotado como procedimento de

dosagem, os seguintes passos: em primeiro lugar a imprimação da betoneira e a colocação do agregado miúdo cerâmico, areia e cimento, para que houvesse o envolvimento das partículas da cerâmica pela pasta de cimento, em seguida, foi colocada metade da água, brita e por fim o restante da água.

Logo depois de colocado o agregado miúdo cerâmico foi feito a pré-molhagem do mesmo, na própria betoneira com o intuito principal de evitar perda de material em qualquer outro recipiente, dando maior praticidade ao processo. Este procedimento foi feito 5 minutos antes da realização da mistura com os outros materiais, onde a água de pré-molhagem foi colocada gradativamente, ao mesmo tempo em que o material cerâmico era misturado com ajuda de uma espátula. A água adicional para a pré-molhagem foi estabelecida de acordo com o descrito no item 4.2.

Após a execução das misturas e confirmação da obtenção do abatimento pré-estabelecido, partiu-se para a moldagem dos corpos de prova segundo NBR 5738 (2008) e também para execução dos ensaios no estado endurecido. No caso das misturas que não alcançaram o intervalo de abatimento proposto, foi mantido o abatimento dado sem qualquer intervenção com adições, aditivos ou acréscimo de água e moldados os corpos de prova para continuação dos ensaios. Sendo que para as misturas que obtiveram o abatimento abaixo do requerido, a moldagem de seus respectivos corpos de prova foi feito com 35 golpes em cada camada, devido à falta de trabalhabilidade das mesmas, o ideal é que se faça a vibração mecânica.

Em relação a moldagem, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de (10x20) cm para os ensaios de absorção por capilaridade, resistência à compressão e (9,5x20) cm para o ensaio de penetração acelerada de cloretos. Foram utilizados corpos de prova cúbicos de (15x15x15) cm para o ensaio de resistividade elétrica e (10x10x35) cm para o ensaio de carbonatação. O adensamento do concreto nas formas dos corpos de prova se deu de forma manual por golpes com haste metálica.

Após a moldagem, estes corpos de prova foram mantidos fora da ação de intempéries por 24 horas até que foi feita a desforma, logo após, foram levados ao tanque de cura com água e cal, até a data dos seus respectivos ensaios, de acordo com o estabelecido nas variáveis.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a análise dos resultados alcançados através do programa experimental sugerido e discussões a respeito.

### 5.1. CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 5.1.1. Abatimento

O abatimento do concreto foi adotado como parâmetro para desenvolver o gráfico de dosagem, portanto foi utilizado o abatimento de  $(80 \pm 20 \text{ mm})$ . Na tabela 15 são mostrados os resultados dos abatimentos (em milímetros).

Tabela 16 - Abatimento em milímetros para cada mistura

		MISTURAS					
		25			12,5		
a/c	REF	80%	60%	40%	80%	60%	40%
0,65	85	120	90	75	100	95	80
0,55	80	95	70	55	90	85	75
0,45	70	80	60	40	85	75	50

De forma geral, a maioria das misturas apresentou o abatimento dentro do previsto, sendo que as taxas de pré-molhagem funcionaram bem e o uso do AMRC não permitiu chegar ao abatimento desejado em algumas misturas, onde os valores foram destacados na tabela.

Foi possível observar a grande influência exercida pelas taxas de pré-molhagem no abatimento das misturas. Os valores em destaque na tabela 15 mostram quais misturas não apresentaram valores dentro do intervalo de abatimento especificado no trabalho. Nota-se que metade das misturas com 40% de pré-molhagem não obtiveram os valores de abatimento necessários para uma moldagem das amostras, ou seja, este valor de pré-molhagem foi o menos satisfatório para utilização em concretos.

Pode-se visualizar também que quanto menor a relação água/cimento, mais difícil foi manter o abatimento pelo incremento do agregado reciclado.

É preciso salientar também que para este trabalho não foi utilizado aditivo superplastificante para obter o abatimento desejado, ou adições para evitar a alta trabalhabilidade das misturas, tendo em vista, o propósito de verificar como as misturas de concreto com agregado cerâmico se comportariam apenas com água de mistura e água de compensação em suas porcentagens preestabelecidas.

Analisando os resultados dos abatimentos pode-se ver também que a finura e a porosidade dos agregados cerâmicos têm grande influência no comportamento das misturas no estado fresco, uma vez que, apenas uma mistura apresentou valor acima do requerido, apresentando alta trabalhabilidade e em outras 3 com baixa trabalhabilidade, mostrando que este tipo de agregado absorve grande quantidade de água em seus poros limitando a mistura da pasta de cimento de maneira adequada e mais homogênea.

## 5.2. CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 5.2.1. Resistência à Compressão Axial

Este ensaio nos proveu de valores de modo que possibilitou a avaliação mecânica dos concretos produzidos. A tabela 17 apresenta os valores da média de 3 corpos de prova rompidos por compressão axial para cada mistura e seus valores de relação água/cimento. Observou-se o maior acréscimo de resistência na mistura de 25% de substituição, com relação a/c 0,45, e taxa de compensação de 40%, apesar desta mistura proporcionar um abatimento abaixo do requerido; e o menor acréscimo ocorreu nas misturas de referência para todas as relações água/cimento. A mistura que mais se aproximou dos valores de referência foi a mistura com 12,5% de substituição, com relação a/c 0,65, e taxa de compensação de 80%, mesmo assim, essa mistura apresentou resultados ligeiramente superiores à referência para ambas as datas de ensaio.

Tabela 17- Valores de resistência à compressão nas idades de 28 e 63 dias.

MISTURA	A/C	IDADE DO ENSAIO (DIAS)	
		28	63
REF	0,65	27,84	32,19
	0,55	32,04	37,48
	0,45	39,67	44,16
25% AMC 80% PM	0,65	35,83	39,44
	0,55	38,77	42,00
	0,45	41,02	45,23
25% AMC 60% PM	0,65	35,47	40,21
	0,55	39,67	43,77
	0,45	44,83	50,27
25% AMC 40% PM	0,65	39,77	44,55
	0,55	42,25	47,46
	0,45	47,13	54,38
12,5% AMC 80% PM	0,65	31,87	33,93
	0,55	34,44	38,17
	0,45	39,79	45,25
12,5% AMC 60% PM	0,65	32,13	35,79
	0,55	37,21	40,44
	0,45	41,34	47,75
12,5% AMC40% PM	0,65	33,46	39,93
	0,55	42,23	43,84
	0,45	43,56	49,10

É interessante ressaltar que todas as misturas apresentaram valores de resistência à compressão superior, quando em comparação as misturas de referência, mesmo aquelas que não obtiveram o abatimento desejado. Ainda é possível observar também que à medida que se aumentou a proporção de substituição houve, paralelamente, um acréscimo de resistência associado. ETXEBERRIA e VEGAS (2015), também observaram que apesar dos valores de absorção capilar mais altos para os concretos com AMC, os valores de resistência foram superiores ao concreto referência.

Este fato mostra que resíduos de cerâmica vermelha possuem grande potencial no provimento de resistência em concretos. Tal fato, pode ser explicado pelo possível efeito pozolânico causado pelas partículas finas do agregado cerâmico em conjunto com o efeito “filler” dos finos cerâmicos gerando uma compacidade maior nas misturas com substituição. CABRAL (2007), afirma que os concretos com agregado miúdo de cerâmica apresentam melhores resultados de resistência à compressão axial em relação ao concreto

referência, provavelmente devido ao efeito pozolânico causado pelo agregado miúdo cerâmico. CABRAL (2009) ratifica sua afirmação, dizendo que as melhoras de resistência em concretos e argamassas podem ter ocorrido devido o efeito pozolânico do agregado miúdo de cerâmica vermelha, já que, fortalece a matriz e a zona de transição entre pasta e agregado. Tendo observado a grande influência da relação água/cimento nas misturas, uma vez que, para valores de substituição iguais as resistências eram maiores à medida que diminuía a relação água/cimento. Logo, para maiores valores de relação a/c, maior a probabilidade da formação de uma película de água sobre os agregados, o que torna a zona transição agregado/pasta de cimento mais fraca, além de incorporar poros maiores em tamanho e quantidade.

MEDINA, FRÍAS e ROJAS (2012), concluíram que o maior valor de resistência à compressão axial foi alcançado quando o agregado miúdo natural foi substituído em 25% pelo agregado miúdo cerâmico, causado pelo refinamento do sistema de poros. NIRMALA e VIRUTHAGIRI (2015) e SENISSE (2015) afirmaram que quanto maior a temperatura de fabricação das cerâmicas utilizadas (900 a 1100°C), maior também a capacidade de majoração da resistência do concreto produzido com este tipo de agregado.

Os materiais cerâmicos apresentam características que podem contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com o agregado miúdo reciclado. Neste sentido, e com base nos resultados apresentados no trabalho desenvolvido por LEITE (2001), observou-se que o material cerâmico finamente moído poderia contribuir com alguma atividade pozolânica, melhorando o desempenho mecânico dos concretos em idades mais avançadas. Este fato, também ocorreu neste trabalho onde todas as misturas com agregado reciclado obtiveram aumentos consideráveis nas idades mais avançadas. Em concordância a essas afirmações SILVA *et al.* (2008) diz que além do efeito químico pozolânico advindo da cerâmica, é possível que haja ainda ligações físicas interagindo em conjunto, como por exemplo, adsorção, forma e rugosidade das partículas de cerâmica.

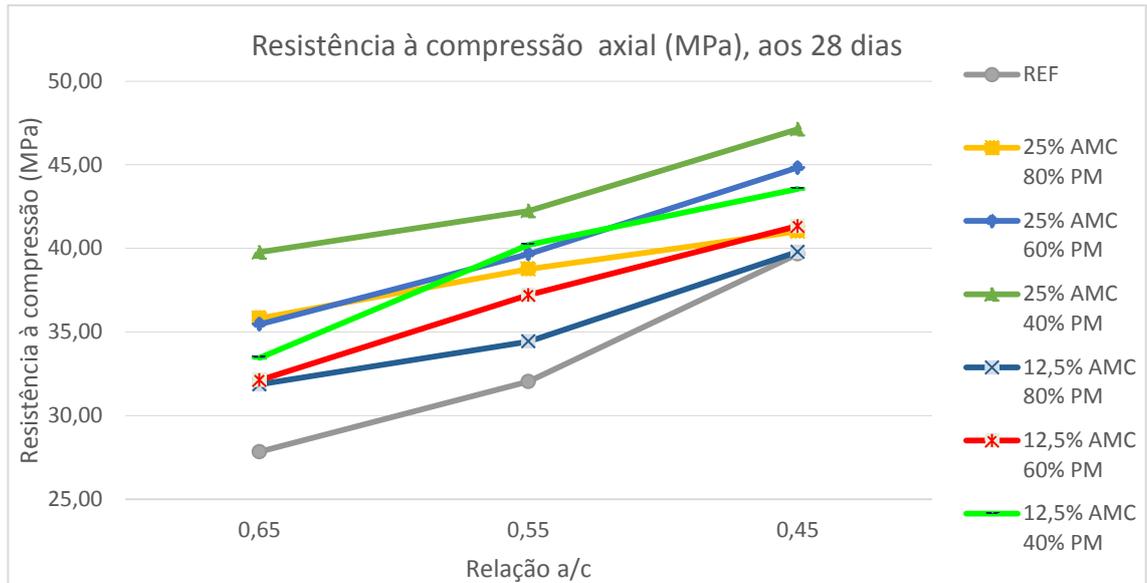


Figura 16- Resistência à compressão aos 28 dias para todas as misturas.

Analisando a figura 16, em concordância com a tabela 13, percebe-se que, todas as misturas independentemente das porcentagens de substituição e taxas de compensação, os valores de resistência superam o concreto referência. Ainda na figura é possível verificar que em alguns casos os valores de resistência se cruzam, apesar de apresentarem valores de substituição do agregado miúdo e valores de compensação diferentes, mostrando que, existe uma compensação da baixa relação a/c com uma taxa de compensação mais elevada e vice-versa. Por exemplo, as misturas 25% AMC 80% PM e 12,5% AMC 60% PM, apresentam valores semelhantes na relação a/c 0,45 tendo a de 12,5% de substituição superando em 0,32 MPa a primeira. Do mesmo modo, a mistura 12,5% AMC 40% SAT, supera a 25% AMC 80% PM e 25% AMC 60% PM na relação a/c igual a 0,55 em 3,46 e 2,56 MPa, respectivamente. Porém, essa mesma é superada pela mistura 25% AMC 60% PM na relação água/cimento 0,45 em 1,27 MPa.

Ainda na análise da figura 16, é notório o ganho de resistência da mistura 25% AMC 60% PM em relação à 25% AMC 80% PM, a partir da diminuição da relação a/c em 0,55; muito provavelmente pela taxa de compensação mais próxima do ideal para a substituição de 25% de AMC. Pode-se perceber também que a mistura 25% AMC 40% PM obteve o maior ganho de resistência entre todas elas, porém, não obteve eficiência no ensaio

de abatimento, ficando bem abaixo dos valores pré-definidos. O baixo valor de compensação de água, provavelmente levou a uma diminuição na relação a/c favorecendo os altos valores de resistência.

Enfim, quando a mistura 12,5% AMC 60% PM supera os valores de resistência da mistura 12,5% AMC 80% PM em todas as relações água/cimento. Isso mostra que a taxa de 60% de saturação de água é a taxa mais próxima do ideal para as duas faixas de substituição do AMC, logo, a taxa de saturação para os AMC tem influência direta no aumento da resistência à compressão para ambas as porcentagens de substituição.

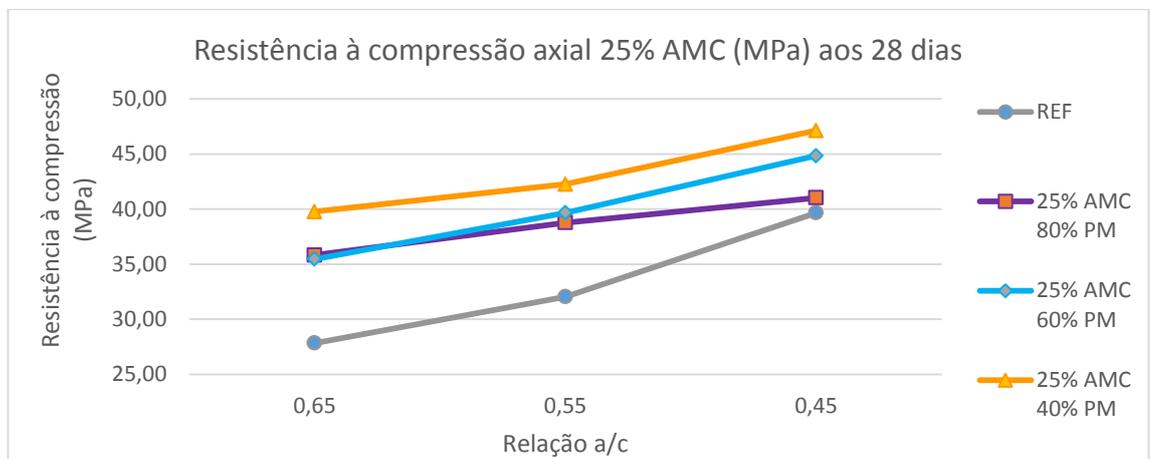


Figura 17– Resistência à compressão para 25% de substituição em 28 dias.

Analisando as figuras 16 e 17, separadamente nota-se que do mesmo modo como a relação a/c influencia positivamente na resistência do concreto, do mesmo modo, quanto menores são os valores de pré-molhagem mais positiva a influência destes nos resultados para resistência à compressão.

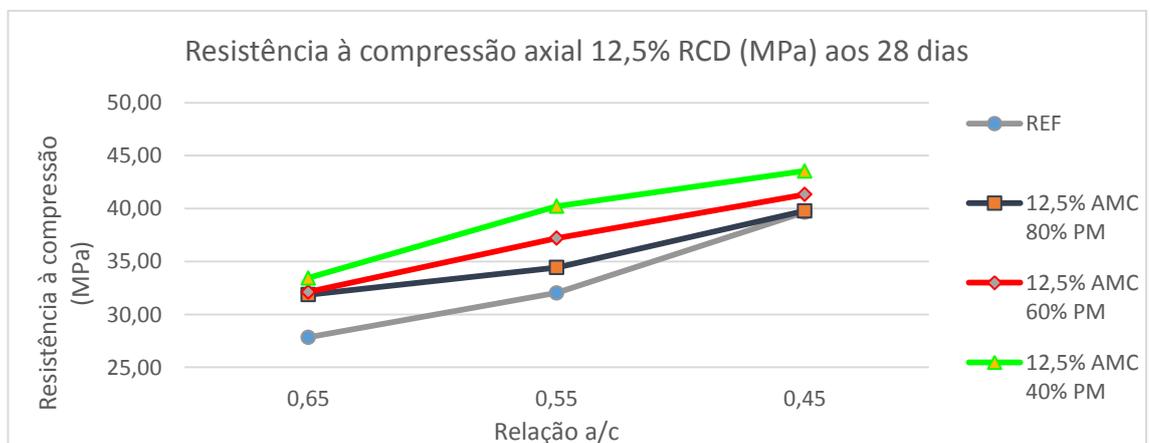


Figura 18 – Resistência à compressão para 12,5% de substituição em 28 dias.

Na figura 18, podemos observar que os valores de resistência na foram tão altos quanto aos da mistura com 25% AMC, mostrando que o teor de substituição exerce grande influência para misturas em relação a esta propriedade. Entretanto, estes mesmos valores são superiores são valores das misturas de referência neste trabalho.

Neste trabalho, os diferentes teores de substituição do agregado e de compensação nas misturas foram utilizados com o objetivo principal de verificar quais os melhores valores para aplicação do resíduo de cerâmica vermelha no concreto. Observa-se que as misturas continuaram a ganhar resistência mesmo após os 28 dias, seguindo assim até os 63 dias de cura.

JIMÉNEZ et al. (2013) e SILVA et al. (2009) observaram que quanto maior a porcentagem de substituição do agregado natural pelo AMC, maior era o ganho de resistência da mistura. Neste caso, mostra-se na figura 19, que este fato não ocorre neste trabalho em sua totalidade, já que, foi encontrado um valor de resistência da mistura de 12,5% de substituição, superior ao da mistura com 25% neste gráfico, portanto, pode-se concluir que as substituições, em conjunto com os teores de pré-molhagem, e as relações água/cimento interagem de forma simultânea alterando as linhas de resistência nos gráficos.

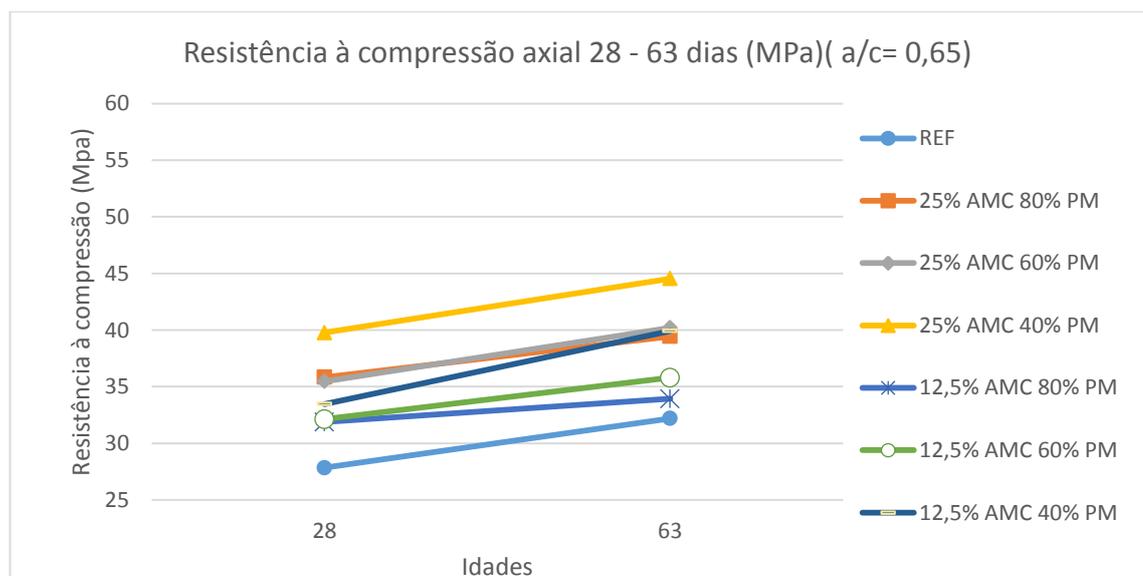


Figura 19 – Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,65.

Na figura 20, a partir da relação água/cimento igual a 0,55, nota-se que as linhas de resistência não se cruzam, apresentando valores mais concisos. Isso mostra como a relação água/cimento pode influenciar de forma isolada o comportamento dos concretos em análise em suas resistências.

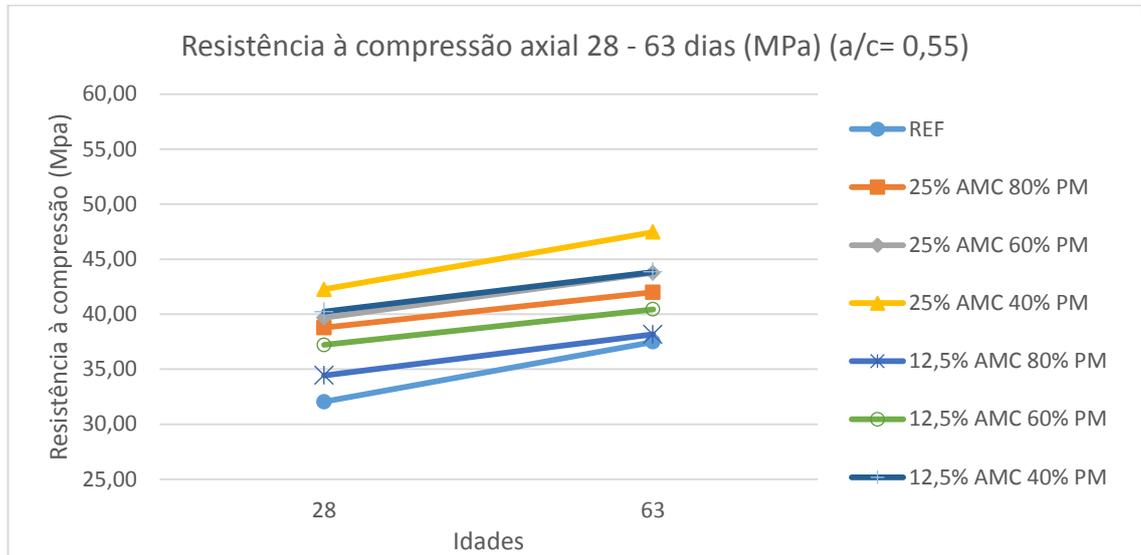


Figura 20 - Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,55.

Nesta figura 20, verificou-se de forma mais clara que dentre as 3 primeiras misturas que apresentaram os maiores valores de resistência, a mistura 25% AMC 60% PM seria a mistura ideal para esta propriedade, visto que, apesar da mistura 25% AMC 40% PM apresentar valores superiores, porém, não ofereceu valor de abatimento satisfatório, de igual modo, a mistura 12,5% AMC 40% PM.

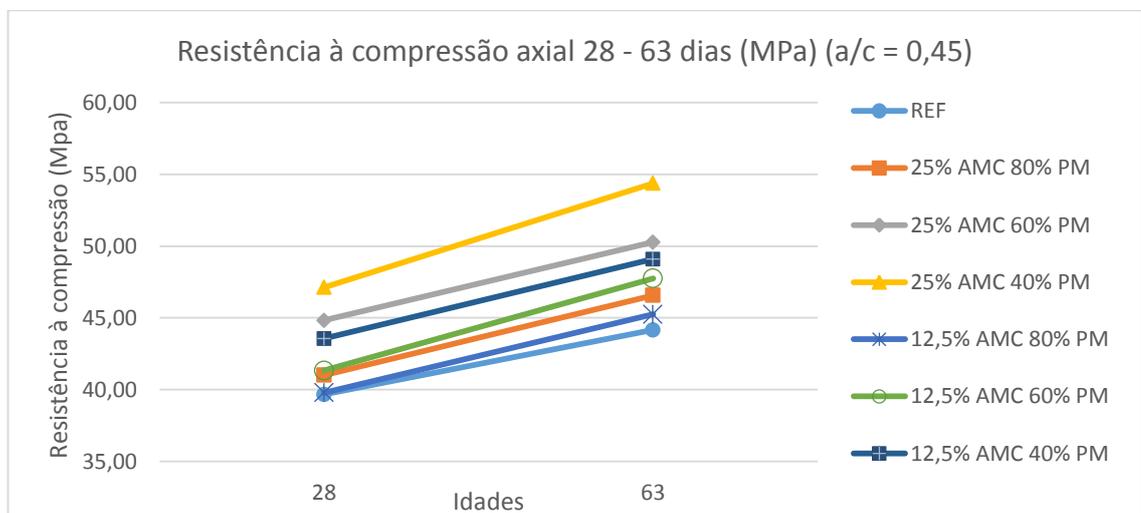


Figura 21 - Resistência à compressão das misturas nas idades 28 e 63 dias para relação água/cimento igual a 0,45.

Na figura 21, pode-se perceber que a mistura 25% AMC 40% PM destaca-se das demais misturas. Esse fato ocorre também nas figuras 19 e 20, mostrando que essa mistura também se aproxima de uma mistura ideal, para utilização do AMC nesta propriedade, com exceção na relação a/c 0,45; onde não houve o abatimento necessário. JACKIEWICZ et al. (2015) observaram que todas as misturas com AMC nas porcentagens de 7%, 15% e 20% também apresentaram valores de resistência superiores ao de referência.

CACHIM (2009), refere que as altas porosidades dos agregados reciclados, geralmente com taxas de absorção de água acima de 15%, fazem com que o consumo de água aumente para manter a trabalhabilidade do concreto fresco. Sendo que, esta água pode se tornar uma fonte de hidratação, em longo prazo, podendo-se considerar esses agregados reciclados como agentes de cura interna, oferecendo uma maior durabilidade ao concreto, bem como, ocorre no concreto com agregados leves. Em relação a atividade pozolânica, pode-se encontrar evidências concretas da influência do pó da cerâmica vermelha no aumento da resistência do concreto. CORDEIRO et al. (2002), estudaram a atividade pozolânica em argamassas de cimento com substituições de 10, 15 e 20% de resíduos de tijolos com finura abaixo de 75  $\mu\text{m}$ , em concreto com substituição de 15%. Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados na referência.

### 5.2.2. Absorção por Capilaridade

Para este ensaio, conforme colocado anteriormente, seguiu-se a NBR 9779 (ABNT, 1995). Os valores obtidos nesta propriedade estão colocados na tabela 18. Esses valores são a média de 3 amostras ensaiadas que representam os valores de absorção capilar obtidos. Na tabela 18 tem-se os valores de absorção capilar unitários em relação à mistura de referência.

Tabela 18- Valores de absorção por capilaridade em g/cm<sup>2</sup> nas idades de 28 e 63 dias.

MISTURAS	28 DIAS			63 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF	1,09	0,99	0,8	0,96	0,87	0,71
25% AMC 80% PM	1,46	1,21	0,87	0,98	0,76	0,69
25% AMC 60% PM	1,35	0,99	0,81	0,86	0,72	0,63
25% AMC 40% PM	1,26	0,8	0,66	0,77	0,7	0,58
12,5% AMC 80% PM	1,02	0,89	0,76	0,89	0,73	0,59
12,5% AMC 60% PM	0,98	0,86	0,7	0,74	0,67	0,55
12,5% AMC 40% PM	0,91	0,77	0,68	0,72	0,6	0,52

É possível uma melhor visualização dos dados a partir de transformação destes em uma relação proporcional onde percebe-se o quanto as misturas se equivalem às misturas de referência. Os valores são mostrados na tabela 19, a seguir.

Tabela 19- Relação proporcional dos valores unitários de absorção por capilaridade.

MISTURAS	28 DIAS			63 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF	1	1	1	1	1	1
25% AMC 80% PM	1,34	1,22	1,09	1,02	0,87	0,97
25% AMC 60% PM	1,24	1	1,01	0,90	0,83	0,89
25% AMC 40% PM	1,16	0,81	0,83	0,80	0,80	0,82
12,5% AMC 80% PM	0,94	0,90	0,95	0,93	0,84	0,83
12,5% AMC 60% PM	0,90	0,87	0,88	0,80	0,77	0,77
12,5% AMC 40% PM	0,83	0,78	0,85	0,75	0,69	0,73

Em se tratando do ensaio de absorção por capilaridade, COUTINHO (2000) observou que, quando da diminuição dos diâmetros dos poros do concreto, a força de absorção capilar se intensifica, e o processo inverso ocorre quando do aumento do diâmetro dos poros. Tal fato, pode justificar os valores

superiores de absorção dos concretos com AMC, em relação ao concreto referência, na idade de 28 dias, para todas as misturas com 25% de substituição, já que o agregado miúdo cerâmico pode ter ocasionado uma diminuição do diâmetro dos poros do concreto aumentando a sucção capilar. Porém, as misturas com 40% de saturação e relação a/c iguais a 0,55 e 0,45 foram exceção. Essas misturas com valores um pouco mais baixos de absorção capilar podem ter apresentado esses valores, também em função dos valores de relação a/c mais baixos nessas misturas, levando assim a apresentar baixa porosidade nesses concretos. Ainda em relação aos resultados das misturas com 25% de substituição se mostrarem superiores à referência na idade de 28 dias, deve-se também à taxa de substituição mais elevada do agregado miúdo em virtude da absorção mais elevada do agregado cerâmico. VIEIRA (2013), constatou que a absorção capilar do concreto foi favorável até o limite de 20% de substituição pelo AMC.

Apesar do eventual efeito pozolânico ocorrido, existe a possibilidade que a quantidade de agregado reciclado inerte na matriz do concreto seja bastante superior a quantidade de material reciclado com potencial para que o ocorra o efeito pozolânico, elevando assim a capacidade de absorção dos concretos curados até esta idade.

Nas misturas com substituição de 12,5%, os valores de absorção foram menores que as misturas de referência para todas as idades, isso possivelmente, se deve ao fato da diminuição da porcentagem de agregado reciclado nas misturas o que, conseqüentemente, diminuiria o grau de absorção capilar do concreto, aliado a diminuição do volume dos poros causada pelo efeito pozolânico e filler das partículas finas do agregado reciclado, o que causou uma grande perda na capacidade de absorção dessas misturas.

Em concordância ao exposto acima, BRAVO (2015) também constatou que misturas com quantidades mais baixas de substituição do agregado natural por agregado reciclado, apresentam melhores resultados, em relação à propriedade de absorção capilar. Segundo o autor, isto ocorre, devido as partículas finas do agregado reciclado ocuparem os vazios na microestrutura

do concreto, contribuindo para o aumento da resistência mecânica e a performance de durabilidade através do aumento da compactidade do concreto. PEDROZO (2008), também mostra que o grande potencial de absorção do agregado reciclado em relação ao agregado natural provoca a incorporação de água no interior da pasta, formando um sistema, onde parte dessa água fica livre e disposta na mistura formando capilares no interior da estrutura. Este autor também mostra que a medida que se aumentou o teor de substituição, maior a capacidade de absorção capilar em argamassas, apesar dos melhores resultados na resistência, o que também ocorreu neste trabalho.

Na idade de 63 dias, todas as misturas com substituição do AMN pelo AMRC apresentaram valores menores de absorção por capilaridade em relação às misturas de referência, tal fato, pode ter-se dado pelo maior tempo de hidratação do concreto e ratifica a ação do possível efeito pozolânico e filler do material cerâmico nas maiores idades, tornando a matriz cimentícia mais compacta.

Ainda é possível observar de acordo com a tabela 18 que quanto menor o valor de substituição de AMN por AMC, menor o valor de absorção dos concretos produzidos. Logo, as porcentagens de substituição do agregado exercem influência direta na absorção por capilaridade das misturas.

#### 5.2.2.1. Influência da utilização do AMC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na absorção por capilaridade.

Para uma melhor avaliação da influência das variáveis nesta propriedade, foi feita a análise ANOVA, que é mostrada na tabela 20.

Tabela 20 - Tabela ANOVA para as variáveis: teor de substituição, idade, relação a/c e taxa de pré-molhagem.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GI</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor de Subst.	0,2453	2	0,1227	3,4651	0,0088	3,1788
Idade	0,5016	1	0,5016	15,224	0,0004	4,0847
Relação a/c	0,716	2	0,358	12,652	6E-05	3,2381
Tx de molhagem	0,2021	3	0,0674	1,708	0,0092	2,8165

De acordo com a análise de variância na tabela ANOVA, quanto à presença de agregado miúdo cerâmico no concreto, pode-se dizer que em razão da porosidade apresentada por estes agregados, a absorção do concreto em questão também sofre acréscimos. Os teores de substituição representam uma influência de maneira ampla para a absorção por capilaridade, já que, todas as misturas produzidas com AMC apresentam um acréscimo de absorção, em parte, maiores que o concreto de referência, à medida que se aumentou a porcentagem de substituição. Deste modo, pode-se considerar que os valores para absorção não são equivalentes do ponto de vista estatístico, ou seja, os teores de substituição dos agregados apresentaram variação de resultados consideráveis em relação à durabilidade para esta propriedade, mostrando a grande influência desta variável para a produção de concretos com este tipo de agregado.

Percebe-se que, apenas a variável taxa de saturação para absorção por capilaridade não resultou em uma divergência maior em relação aos valores de referência, ou seja, em relação às outras variáveis, foi a que menos causou influência nas misturas. Este fato é procedente, uma vez que as misturas com 80 e 60% de saturação dos agregados apresentaram em grande parte, valores maiores que as misturas de referência, e as misturas com 40% apresentaram valores menores, proporcionando assim certa equivalência entre os valores médios todas as misturas em relação à referência. Porém, este fato não quer dizer que a influência das diferentes taxas de saturação seja desprezível, pois, apesar desta equivalência estatística, os valores em relação às taxas de saturação não foram iguais, pelo contrário, percebe-se nas tabelas 18 e 19 que quanto menor foi o valor da taxa de saturação menor também foram os valores de absorção por capilaridade para as misturas.

Com relação às variáveis idade e relação a/c, apresentaram de acordo com a análise ANOVA grande variância de valores em relação aos valores de referência, mostrando que ambas apresentam grande influência para o concreto produzido com AMC. Com relação à variável idade, o maior período de cura aliado ao eventual efeito pozolânico, pode ter melhorado a matriz cimentícia do concreto e diminuído a quantidade de poros dos concretos com agregado reciclado, este fato justificaria a grande queda dos valores de

absorção por capilaridade após até os 63 dias de cura dos concretos, uma vez que todas as misturas até 63 dias de cura mostraram valores menores que os concretos de referência ou valores semelhantes.

Ainda podemos visualizar a influência mais intensa por parte da variável relação a/c na absorção por capilaridade, uma vez que quanto maior a relação a/c, maior também foi a absorção do concreto para todas as misturas. Porém, os resultados para essas mesmas misturas foram melhores que os valores de referência após 63 dias de cura. Assim tem-se que a quantidade de água das misturas é a variável mais influente para o controle da porosidade, determinação do tamanho dos poros e a conectividade entre eles, logo, em consequência também da absorção de água dos compósitos.

VIEIRA (2013) afirma ainda que o método de pré-molhagem do agregado e o método de compensação de água proporcionam resultados inversos, sendo que após a pré-molhagem dos agregados, estes se encontram preenchidos em seus poros por água, enquanto que, no processo de compensação de água durante a mistura, os poros dos agregados são preenchidos por uma pasta cimentícia, tornando a argamassa mais fortalecida. Este autor ainda afirma que o possível efeito pozolânico do material fino pode levar a uma eventual diminuição de porosidade dos concretos.

Logo, estes fatos podem ser a razão para os valores menores encontrados para as misturas com 12,5% de substituição do AMN por AMC na idade de 28 dias. GOBINATH, MANOHARAN e SENTHAMARAI (2011) ainda concluíram que a textura da superfície dos agregados cerâmicos também é um fator decisivo para definir o grau de absorção dos concretos produzidos com agregados cerâmicos, uma vez que, os agregados cerâmicos apresentam uma superfície rugosa. VIEIRA (2013), também concluiu que a incorporação de agregados com elevada absorção de água e com forma rugosa proporcionam ao concreto uma pasta mais forte, mas que em contrapartida devido às taxas mais elevadas da relação a/c em conjunto a uma pasta fortalecida os poros deste concreto tendem a ter dimensões menores, o que intensifica o processo de absorção por capilaridade.

Levando-se em consideração também o abatimento estabelecido, a mistura 12,5% AMC 40% PM e relação a/c igual a 0,55 mostrou-se como a mistura ideal para esta propriedade, uma vez que, apresentou os menores valores de absorção capilar, em ambas as idades de 28 e 63 dias.

### 5.2.3. Carbonatação acelerada

Após aspersão de fenolftaleína, todos os corpos de prova foram fotografados para mais tarde ser feita a análise da profundidade carbonatada. É importante ressaltar que inicialmente a carbonatação não é prejudicial ao concreto, pelo contrário, este chega até mesmo ajudar na densificação do concreto, aumentando a sua resistência. Porém, quando a carbonatação atinge a armadura, este deixa de estar protegida contra agentes que provocam corrosão.

Os valores das profundidades de carbonatação foram extraídos das medidas dos 4 lados de cada corpo de prova estudado, resultando em uma média desses valores para cada corpo de prova, onde o resultado final foi a média dos 3 corpos de prova para cada mistura. A seguir na tabela 21, são apresentados os valores da profundidade de carbonatação obtidos para cada tipo de concreto, e os coeficientes de carbonatação ( $KCO_2$ ), obtidos a partir da inclinação da reta da regressão linear das profundidades carbonatada em função do tempo (raiz de semanas).

Tabela 21- Profundidades de carbonatação para os diferentes períodos de exposição e o coeficiente de carbonatação das misturas e relação água/cimento.

MISTURA	RELAÇÃO A/C	Profundidade de carbonatação (mm) x Idade (dias)						KCO <sub>2</sub> (mm)/√sem
		0	3	7	14	21	28	
REF	0,65	0,00	3,56	4,04	4,90	5,80	6,25	2,9483
	0,55	0,00	2,57	3,43	4,12	4,82	5,00	2,4581
	0,45	0,00	2,11	3,18	3,90	4,30	4,60	2,2868
25% AMC 80% PM	0,65	0,00	3,19	4,14	4,56	5,17	5,33	2,6914
	0,55	0,00	2,07	3,03	3,47	4,20	4,90	1,9481
	0,45	0,00	1,54	2,26	2,81	3,32	3,80	1,8493
25% AMC 60% PM	0,65	0,00	3,13	3,87	4,34	4,70	4,74	2,6528
	0,55	0,00	1,88	2,23	2,88	3,20	3,70	1,7398
	0,45	0,00	1,19	1,42	1,93	3,22	3,60	1,7756
25% AMC 40% PM	0,65	0,00	1,97	2,68	3,02	3,30	4,20	1,8977
	0,55	0,00	1,04	1,97	2,52	3,07	3,60	1,8029
	0,45	0,00	0,89	1,21	1,74	2,12	2,70	1,2903
12,5% AMC 80% PM	0,65	0,00	3,05	3,77	4,40	4,71	5,04	3,6205
	0,55	0,00	2,23	3,14	3,90	4,20	4,54	2,2000
	0,45	0,00	1,44	1,95	2,46	2,77	3,30	2,1584
12,5% AMC 60% PM	0,65	0,00	1,78	2,17	2,96	3,30	4,00	1,8862
	0,55	0,00	1,25	1,83	2,38	2,80	3,30	1,6033
	0,45	0,00	1,12	1,42	1,89	2,10	2,60	1,2184
12,5% AMC 40% PM	0,65	0,00	1,65	2,04	2,81	3,39	4,09	1,9644
	0,55	0,00	1,18	1,72	2,03	2,78	3,52	1,6442
	0,45	0,00	0,91	1,28	1,52	1,96	2,68	1,2254

Nas figuras a seguir são apresentadas as linhas de tendências para todas as misturas e relações a/c. A partir do alinhamento das retas foram obtidos os valores  $r^2$  e as equações do tipo  $y = ax + b$ , onde o valor de “a” é o valor do coeficiente apresentado na tabela 20. Como forma de estimar o tempo equivalente para que ocorra o mesmo grau de carbonatação, tanto na exposição na câmara de carbonatação como a exposição no meio ambiente, é adotado o modelo para estudo da difusão do CO<sub>2</sub>, “ $e = k \text{ CO}_2 \times \sqrt{t}$ ”, onde para se obter a relação entre os tempos necessários para que ocorra a mesma profundidade de carbonatação, é necessário estimar o valor de KCO<sub>2</sub>, quando inserido na atmosfera.

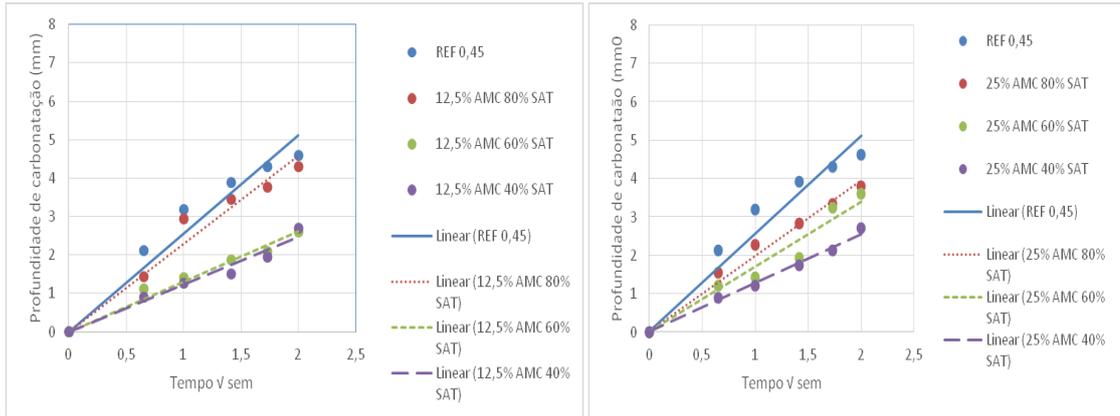


Figura 22–Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,45.

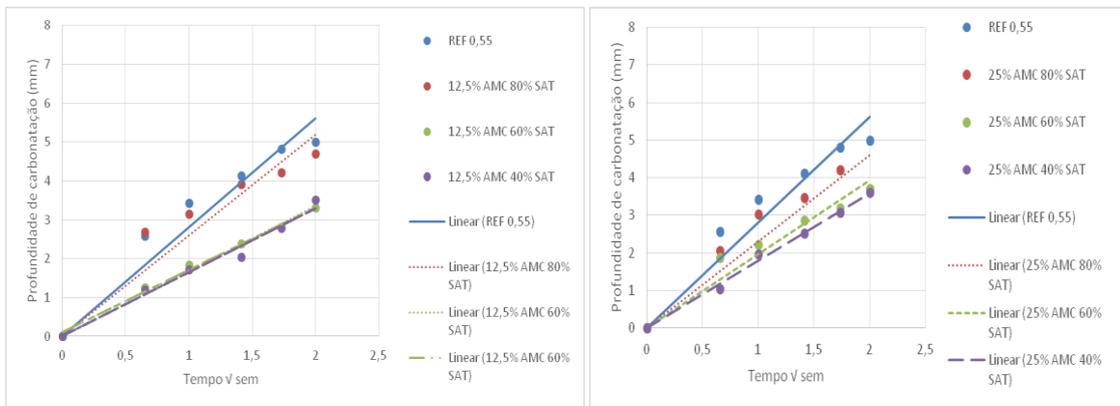


Figura 23 - Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,55.

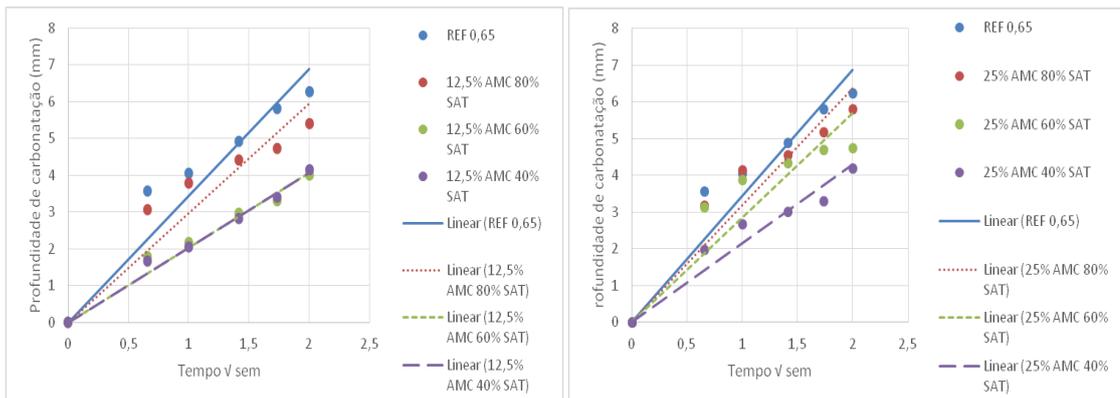


Figura 24 - Linhas de tendência para as misturas de referência e com substituição de 12,5% e 25% de AMRC, para relação a/c=0,65.

Tabela 22- Tabela de equações e  $r^2$  para retas de regressão linear para todas as misturas.

MISTURA	RELAÇÃO A/C	Equação da Reta Linear	$r^2$
REF	0,65	$y = 2,9483x + 0,7498$	0,9361
	0,55	$y = 2,4581x + 0,5370$	0,9495
	0,45	$y = 2,2868x + 0,0,4229$	0,9557
25% AMC 80% PM	0,65	$y = 2,6914x + 0,0,7593$	0,9215
	0,55	$y = 1,9480x + 0,5368$	0,8878
	0,45	$y = 1,8492x + 0,1922$	0,9875
25% AMC 60% PM	0,65	$y = 2,2514x + 0,9114$	0,8511
	0,55	$y = 1,7398x + 0,3429$	0,9600
	0,45	$y = 1,7755x - 0,1193$	0,9551
25% AMC 40% PM	0,65	$y = 1,8976x + 0,3773$	0,9455
	0,55	$y = 1,8028x - 0,0101$	0,9943
	0,45	$y = 1,2902x - 0,0191$	0,9910
12,5% AMC 80% PM	0,65	$y = 3,6205x + 0,4512$	0,9765
	0,55	$y = 2,2000x + 0,6079$	0,9267
	0,45	$y = 2,1584x + 0,2067$	0,9593
12,5% AMC 60% PM	0,65	$y = 1,8862x + 0,2303$	0,9800
	0,55	$y = 1,6033x + 0,1093$	0,9796
	0,45	$y = 1,2183x + 0,1401$	0,9650
12,5% AMC 40% PM	0,65	$y = 1,9644x + 0,1117$	0,9897
	0,55	$y = 1,6442x + 0,0046$	0,9796
	0,45	$y = 1,2253x + 0,0060$	0,9650

### 5.2.3.1 Influencia das variáveis relação a/c, idade e teor de AMRC, na carbonatação do concreto.

Para avaliar a influência das variáveis em relação a profundidade de carbonatação nas misturas com AMC, foi feito uma análise de variância ANOVA, a qual mostrou o nível de significância de cada uma nas misturas.

Tabela 23- Análise de variância ANOVA para as variáveis no ensaio de carbonatação.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Relação a/c	43,982	2	21,991	14,967	1,99652E-06	3,0855
Dias de exposição ao CO <sub>2</sub>	247,05	5	49,41	49,384	1,51564E-27	2,2899
Teor de AMC	42,593	2	21,297	11,761	1,95681E-05	3,0632

Na análise de variância na tabela 23 percebe-se que a idade de exposição das misturas  $\text{CO}_2$  tem grande significância nos resultados de carbonatação, enquanto que as variáveis relação a/c e teor de AMRC, apesar de sua importância, apresentam uma menor influência para a profundidade de carbonatação, comparadas à influência dos dias de exposição ao  $\text{CO}_2$ .

A seguir, é mostrada uma sequência de figuras para melhor visualização da interação das variáveis na carbonatação do concreto. Na figura 25, é exposta a profundidade média das datas de ensaio (3, 7 e 28 dias) após 91 dias de cura em função do tipo de mistura.

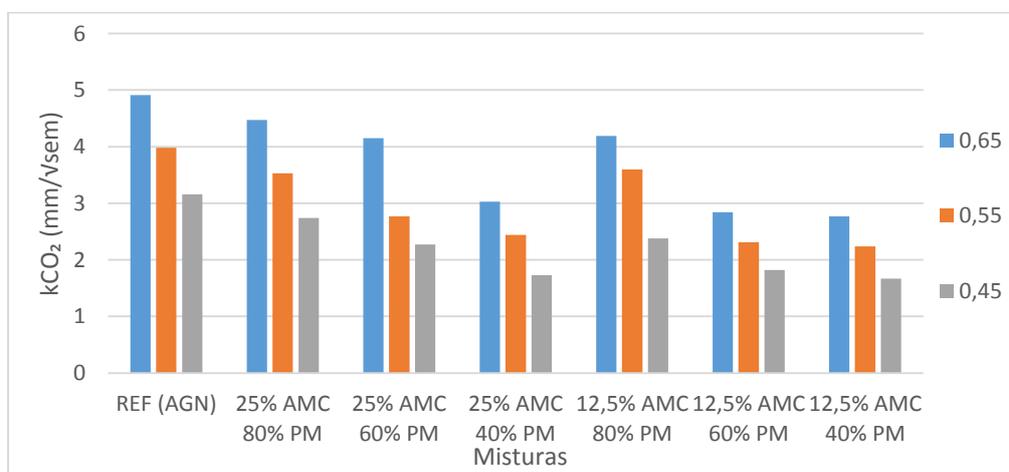


Figura 25 -  $\text{KCO}_2$  em função do tipo de mistura para as relações a/c.

Na análise desta figura, pode-se inferir que as misturas com AMC apresentaram valores menores de carbonatação do que as de referência. Também é possível observar que quanto maior a porcentagem de AMC, maior também o grau de carbonatação sofrido no concreto. A medida que a relação a/c diminui, também é menor a profundidade de carbonatação entre cada mistura. Pode-se perceber também a influência da taxa de pré-molhagem, onde, quanto menor foi a taxa, menor também a carbonatação do concreto. Outro fato é que as misturas 25% AMC 60% PM e 12,5% AMC 80% para a relação 0,65, são bem próximas em seus valores no avanço da carbonatação, mostrando que apesar da diferença na porcentagem de substituição do AMRC, as taxas de pré-molhagem proporcionaram algum tipo de compensação para essas misturas e vice-versa.

Para as misturas com 25% de AMC na relação a/c igual a 0,65, em média a diferença na profundidade de carbonatação foi de 21% a menos em relação a mistura referência. Na relação a/c igual a 0,55 as misturas com 25% AMC apresentaram valores em média 27% inferiores ao da mistura referência, sendo que, para a relação a/c igual 0,45, este valor foi de 29%. Para as misturas com 12,5% de AMC a média da diferença dos valores de profundidade de carbonatação em relação às misturas de referência foi de 34% inferiores para a relação a/c igual a 0,65, sendo de 32% para a relação a/c igual a 0,55 e de 38% para a relação a/c igual a 0,45. LEVY (2001), observou que para uma substituição de 50% de AMC, havia a redução de 33% na profundidade de carbonatação, quando aumentado 3,1% da dosagem de cimento na mistura. Sendo que para a mistura de referência obter a mesma profundidade de carbonatação esse aumento na dosagem de cimento teria que ser de mais de 27%. Este fato mostra o quanto o agregado cerâmico pode ser viável economicamente, trazendo consigo sustentabilidade.

A seguir é mostrado na figura 26 a profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento das misturas.

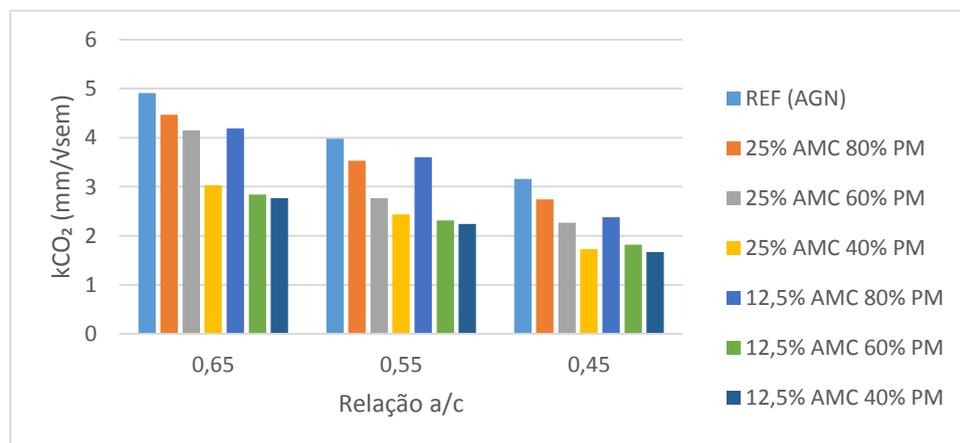


Figura 26 -  $KCO_2$  em função da relação a/c para cada tipo de mistura.

Analisando a figura 26 pode-se destacar que as misturas de referência apresentaram em todas as relações água/cimento valores de profundidades carbonatada maiores que as misturas com AMC. Todas as misturas diminuíram as profundidades de carbonatação a medida que foi menor a relação a/c, entretanto, pode-se observar que para a relação a/c igual a 0,65, as misturas 25% AMC 80% PM, 25% AMC 60% PM e 12,5% AMC 80% PM apresentaram

valores mais próximos do valor da mistura de referência. Na relação a/c igual a 0,55, apesar da queda de valores em relação ao fator a/c 0,65, os valores se mostraram semelhantes ao anterior, sendo que houve uma queda maior da mistura 25% AMC 60% PM, e as misturas 25% AMC 80% PM e 12,5% AMC 80% PM ainda apresentaram valores próximos da mistura de referência, com destaque para esta última mistura que superou os valores de profundidade de carbonatação de todas as misturas com exceção da referência. Para a relação a/c igual a 0,45, a queda de valores se manteve, porém, as misturas com AMC não apresentaram valores próximos aos da referência, apresentando uma queda considerável nos valores de profundidade de carbonatação.

Provavelmente, a combinação da interação entre as variáveis, como a baixa taxa de substituição do AMC e principalmente a alta taxa de saturação, tenha contribuído para os níveis um pouco mais altos de profundidade de carbonatação na mistura 12,5% AMC 80% PM, já que as outras misturas com essa porcentagem de substituição mostraram valores bem inferiores as demais misturas em cada relação a/c. Isso mostra que é preciso ter cautela na utilização de valores baixos de substituição e principalmente encontrar valores mais ideais de pré-molhagem. KULAKOWSKI (2002), também percebeu a influência da relação a/c na carbonatação do concreto, onde quanto menor a relação a/c menor também a profundidade de carbonatação, e para relação a/c igual ou menor a 0,45 não houve carbonatação do concreto. Apesar do trabalho desta autora utilizar somente adição de sílica ativa no concreto, pode-se verificar que independentemente do tipo de resíduo utilizado, a relação a/c influencia fortemente nas características e propriedades finais do concreto, uma vez que, se pode considerar a grande influência do possível efeito pozolânico do AMC nas misturas deste trabalho.

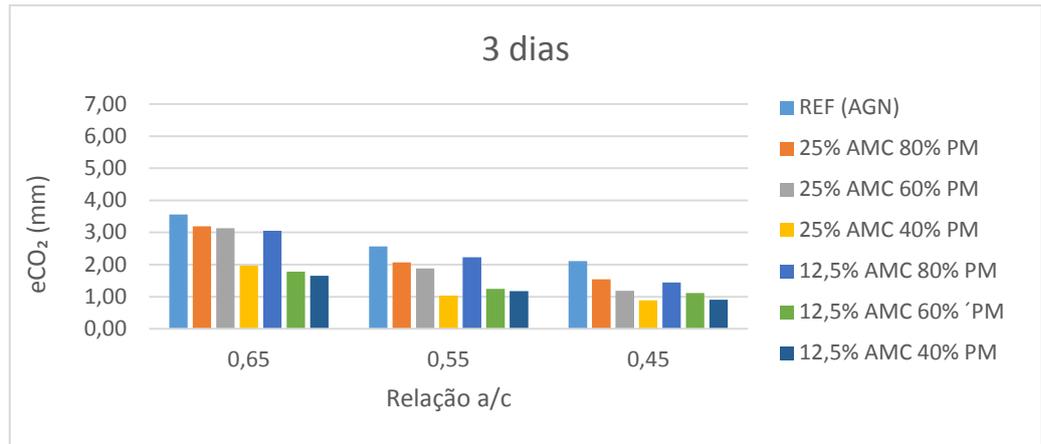


Figura 27– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 3 dias de exposição.

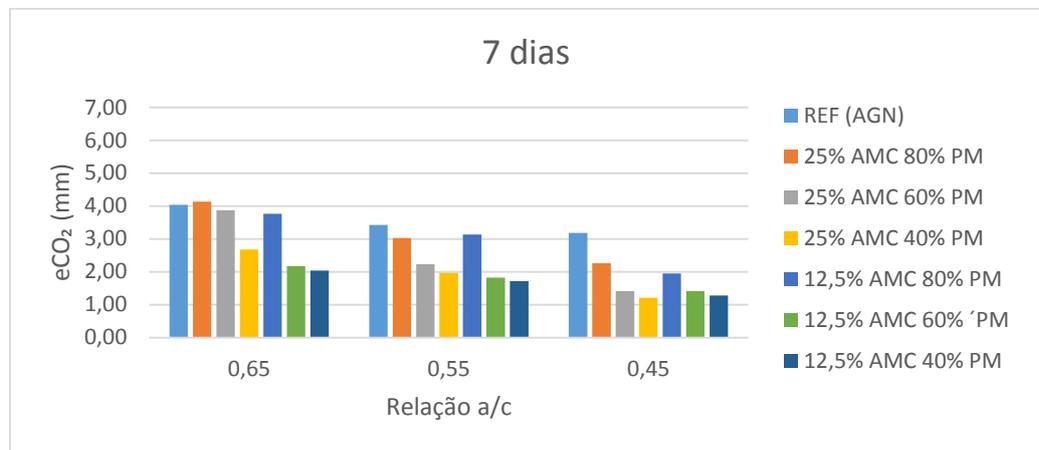


Figura 28– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 7 dias de exposição.

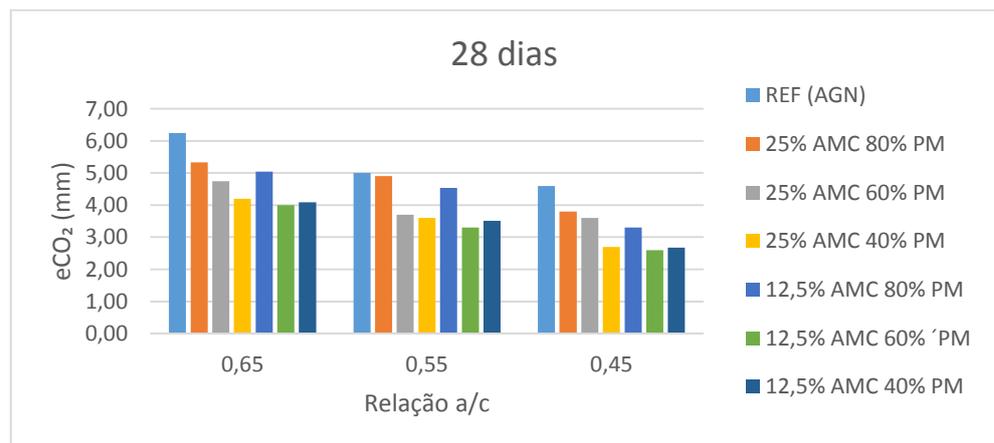


Figura 29– Profundidade de carbonatação em função da relação a/c para cada mistura aos 28 dias de exposição.

De modo geral, nas Idades analisadas pode-se perceber que as idades com maior relevância na análise da carbonatação foram as idades de 3 e 28 dias. Outro fato é que o maior avanço da frente de carbonatação se deu nos

primeiros 3 dias de exposição das amostras na câmara de carbonatação. REIS (2013), observou que este mesmo fenômeno ocorria em sua análise em concretos com agregados graúdos de cerâmica vermelha. Do mesmo modo, PAULETTI (2009), em sua análise para argamassas utilizando AMC, mostrou que este fato também ocorria, porém, apenas para misturas com relação a/c mais altas.

De acordo com a figura 29, pode-se inferir de um modo geral que aos 3 dias a mistura que apresentou maior profundidade de carbonatação foi a de referência, seguida da mistura 25% AMC 80% PM, enquanto, as que apresentaram menor profundidade de carbonatação foram a mistura 25% AMC 40% PM e 12,5% AMC 40% PM, este fato se tornou notório nas relações água/cimento mais baixas. É preciso notar também que a mistura 12,5% AMC 80% apresentou elevado nível de carbonatação aos 3 dias em todas as relações a/c, chegando a superar os valores de todas as misturas com exceção da mistura de referência na relação a/c igual a 0,55.

Nas idades de 7, 14 e 21 observou-se um comportamento semelhante ao das misturas aos 3 dias, porém, aos 7 dias a mistura 25% AMC 80% PM superou o avanço de carbonatação para todas as misturas na relação a/c igual 0,65. Sendo a mistura 12,5% AMC 40% PM a de menor profundidade carbonatada. Para a idade de 14 dias e 21 dias, as misturas em todas relações a/c apresentaram um comportamento padronizado, onde a mistura de referência se destacou das demais, seguida da mistura 25% AMC 80% na relação a/c igual a 0,65. Por último a mistura 12,5% AMC 40% PM com o menor avanço da frente carbonatada para essa idade.

Concluindo a análise, na idade de 28 dias de exposição das misturas, o comportamento manteve-se para todas as relações a/c, sendo a mistura de referência, a mais suscetível a difusão de CO<sub>2</sub>, seguida das misturas 25% AMC 80% PM. Por último a 12% AMC 60% PM com a menor incidência da frente de carbonatação entre todas as misturas.

Portanto, apesar do agregado reciclado apresentar alta porosidade incentivando o avanço da frente de carbonatação, a presença do efeito filler e até mesmo a ajuda do possível efeito pozolânico causado pelo agregado

reciclado, contribuíram para uma melhora desta propriedade em relação ao concreto de referência, dificultando a difusão do gás CO<sub>2</sub> na microestrutura do concreto. Ainda se conclui que o valor de pré-molhagem de 80% mostra-se um pouco desfavorável para um melhor desempenho das misturas com uso do AMC, nesta propriedade.

#### 5.2.4. Resistividade Elétrica

A avaliação desta propriedade foi feita com a finalidade de verificar a suscetibilidade destas misturas a corrosão, visto que, quanto maior a resistividade, menor a probabilidade de corrosão. Neste ensaio, os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias e 63 dias, após 24 horas da retirada dos mesmos dos tanques de cura. Sendo assim, houve a secagem superficial dos corpos de prova, para assim evitar qualquer interferência da umidade nos resultados de resistividade. Na tabela 24 são apresentados os resultados da média de 3 medidas em cada corpo de prova ensaiado para cada mistura, aos 28 e 63 dias.

Tabela 24- valores médios dos resultados obtidos nos corpos de prova no ensaio de resistividade elétrica em Ohm.m.

MISTURAS	28 DIAS			63 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF	18609	24117	26427	21673	27801	33402
25% AMC 80% PM	21566	26418	33517	27796	28298	39766
25% AMC 60% PM	30598	33539	41318	35076	39543	52591
25% AMC 40% PM	38404	43052	51809	45381	54633	61457
12,5% AMC 80% PM	19766	24825	28327	23892	27875	34766
12,5% AMC 60% PM	21219	26166	31742	26804	29785	37216
12,5% AMC 40% PM	29766	31825	37327	30422	37273	41549

A seguir, foi feito na tabela 25, os valores de resistividade proporcionais para um melhor entendimento entre os valores das misturas.

Tabela 25- Valores de resistividade em proporção unitária.

MISTURAS	28 DIAS			63 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF	1	1	1	1	1	1
25% AMC 80% PM	1,15	1,09	1,26	1,28	1,01	1,19
25% AMC 60% PM	1,64	1,39	1,56	1,61	1,42	1,57
25% AMC 40% PM	2,04	1,78	1,96	2,09	1,96	1,83
12,5% AMC 80% PM	1,06	1,02	1,07	1,1	1	1,04
12,5% AMC 60% PM	1,14	1,08	1,2	1,23	1,07	1,11
12,5% AMC 40% PM	1,59	1,31	1,41	1,4	1,34	1,24

Na tabela 25, onde os valores foram colocados em proporção em relação às misturas de referência, pode-se observar que todos os valores foram superiores aos valores de resistividade das misturas de referência, com exceção de uma. Pode-se perceber também que a mistura que apresentou o melhor desempenho em relação a esta propriedade em questão foi a mistura 25% AMC 40% PM e relação água/cimento igual à 0,65, uma vez que, apenas esta relação água/cimento obteve o abatimento requerido. Apresentando resultados em média, 94% maior que a referência, enquanto que o “menor” desempenho, foi a mistura 12,5% AMC 80% PM, que apresentou resultados, em média, 3% maior que as de referência.

De um modo geral, na análise dos resultados é possível perceber que todas as misturas com substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico, apresentaram valores de resistividade elétrica maior que as misturas de referência. O AMC utilizado na confecção dos concretos gerou um aumento na resistividade do concreto quanto maior foi a sua utilização, apesar da relativa porosidade do material cerâmico, o que teoricamente diminuiria a resistividade do concreto. Portanto, é preciso considerar ainda o possível efeito pozolânico dos finos do AMC, melhorando a hidratação da matriz do concreto e o efeito filler de preenchimento dos vazios da microestrutura do concreto, causando diminuição da quantidade de poros e sua conectividade no concreto, aumentando assim sua compacidade, haja vista que, outras propriedades do concreto foram melhoradas como já foi visto anteriormente.

Na análise direta dos valores da tabela 24, em relação às variáveis, é perceptível a grande importância da pré-molhagem do agregado cerâmico, uma vez que, as diferenças mais significativas de valores na resistividade elétrica das misturas encontram-se nas taxas de pré-molhagem. A média de aumento da resistividade elétrica em relação às misturas de referência para as misturas com 25% de substituição, encontra-se em torno de 14, 35 e 48%, para 80, 60 e 40% de taxa de pré-molhagem, aos 28 dias, e de 14, 35 e 49%, na idade de 63 dias, respectivamente. Para as misturas com 12,5% de substituição a média está em 14, 12 e 30%, para 80, 60 e 40% de saturação, aos 28 dias e de 10, 9 e 25% na idade de 63 dias, respectivamente.

Na média geral, em relação às taxas de saturação, nas misturas com 25% de substituição, os valores de resistividade foram em média 32% superiores aos valores das misturas referência, também para as misturas com 12,5% de substituição os valores de resistividade foram em média 18% superiores as misturas de referência. Estes dados mostram que o agregado cerâmico mostrou ótimo resultado para sua utilização no concreto em relação à resistividade elétrica do mesmo, é possível perceber também que quanto maior a taxa de substituição, maiores os valores de resistividade.

Analisando a relação  $a/c$ , a média de aumento de resistividade, em relação às misturas de referência, para as misturas com 25% de substituição aos 28 dias foi de 39% em 0,65; 30% em 0,55 e 37% em 0,45; e de 40, 32 e 35% aos 63 dias, respectivamente. Para as misturas com 12,5% de substituição, aos 28 dias, foi de 22% em 0,65; 13% em 0,55 e 19% em 0,45; e de 20, 13 e 35%, aos 63 dias, respectivamente. A seguir é mostrado no conjunto de figuras 30, os valores de resistividade elétrica para todas as misturas e idades, em função da relação  $a/c$ .

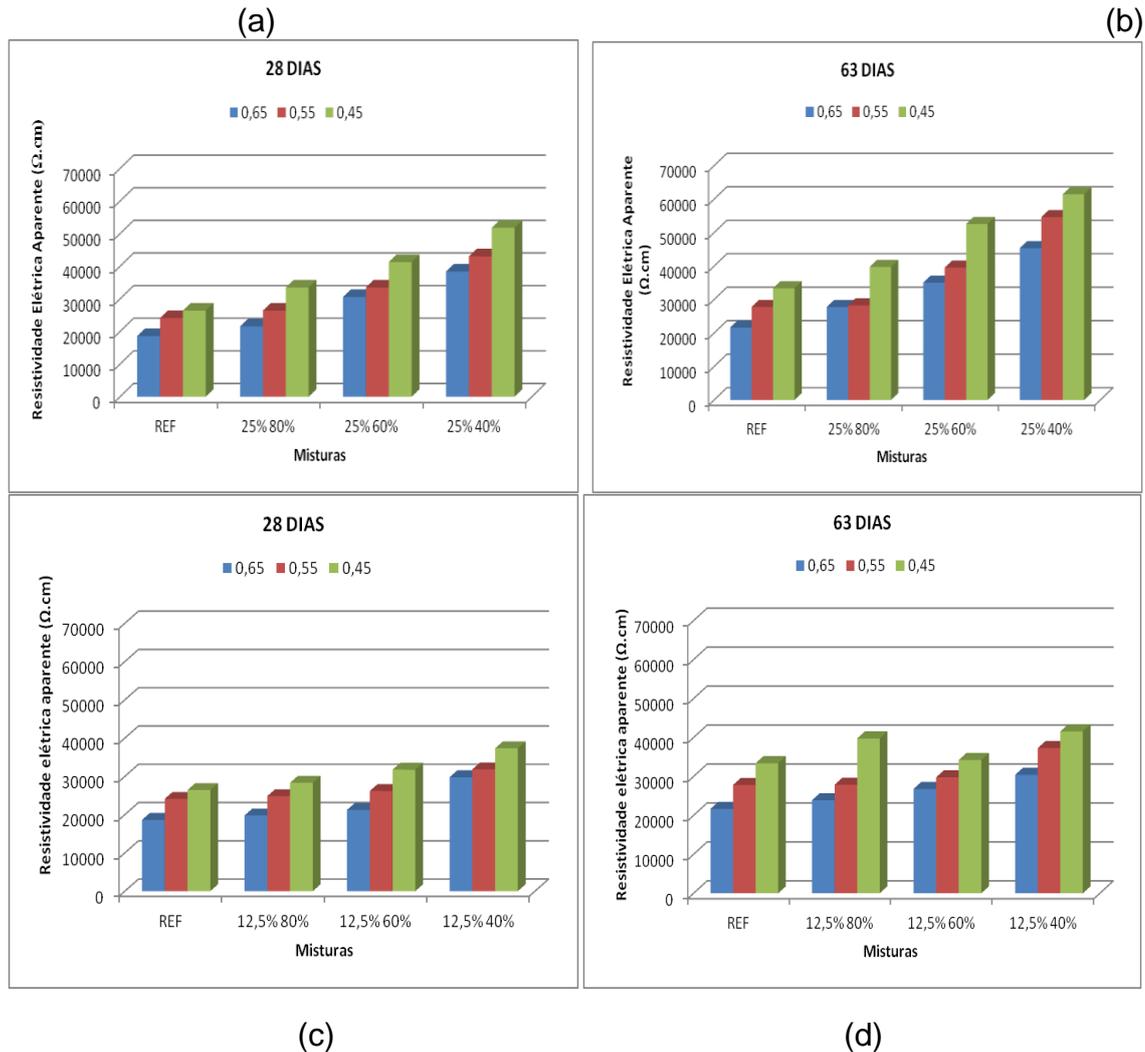


Figura 30 - Valores de resistividade elétrica aparente em função da relação a/c (a) 25% AMRC aos 28 dias, (b) 25% AMRC aos 63 dias, (c) 12,5% AMRC aos 28 dias, (d) 12,5% AMRC aos 63 dias.

Nota-se no conjunto de figuras 30 (a, b, c e d) a influência das diferentes relações a/c, onde quanto menor a relação a/c, e menor os valores de saturação, maiores os valores de resistividade elétrica nos concretos, tanto aos 28 dias como para 63 dias de cura. Este fato já havia sido constatado também no trabalho de WHITTINGTON, MCCARTER e FORDE (1981). Ainda GJØRV, VENNESLAND e EI-BUSIADY (1977) compararam os efeitos da saturação de água e relação a/c em concretos perante a resistividade elétrica, verificando o aumento dessa propriedade para menor saturação de água e menor relação a/c.

Ainda é possível perceber que as misturas com 25% de substituição apresentam os maiores valores de resistividade elétrica, e à medida que os

valores de pré-molhagem diminuem, os valores de resistividade são maiores, mostrando a influência desta variável para o trabalho. Enquanto que, as misturas com 12,5% de substituição ainda mostram alguma semelhança com as misturas de referência, mas com uma porcentagem maior de resistividade elétrica, também à medida que se diminui a porcentagem de pré-molhagem.

#### 5.2.4.1. Influência do teor de AMRC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na resistividade elétrica.

Para avaliação das variáveis idade, taxa de saturação e relação a/c na resistividade, também foi feita a análise de variância ANOVA com cada variável para melhor confiabilidade na compreensão da influência de cada uma em relação a resistividade elétrica. Na tabela 26 são apresentados os resultados da ANOVA para as variáveis idade, taxa de saturação e relação a/c.

Tabela 26 - ANOVA das variáveis estudadas na resistividade elétrica em concretos com AMC.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Relação a/c	1,54E+09	1	1,54E+09	25,98296	2,81E-06	3,977779
Taxa de molhagem	1,88E+09	3	6,28E+08	10,87379	1,81E-05	2,816466
Idade	1,35E+09	2	6,73E+08	9,892838	0,000234	3,178799
Teor de AMC	1,77E+09	2	8,85E+08	14,83503	8,35E-06	3,178799

Analisando a tabela ANOVA, podemos notar a influência significativa de duas variáveis sendo elas, relação a/c e a taxa de saturação, onde ambas mostram valores de “p” abaixo de 0,01, mostrando 99% de confiabilidade dos dados e o grau de influência dessas variáveis para as misturas. Porém, a variável idade, apesar de sua influência nos valores finais de resistividade, pela análise ANOVA não foi uma variável que exerceu uma influência tão forte quanto as outras, de modo geral nas misturas. Nota-se ainda que, a relação a/c, é a variável com a maior significância para esta propriedade em questão

A tabela ANOVA, também mostra uma grande influência do teor de AMRC sobre os valores de resistividade elétrica nas misturas. E o valor de “p” mostra a confiabilidade dos dados, pois apresenta um valor bem abaixo da tolerância de igualdade adotada de 0,01. A forte influência do AMC na

resistividade do concreto é justificada também no trabalho de WHITING e NAGI (2003), onde os autores afirmam que a resistividade é conduzida principalmente pela pasta de cimento, porém, o tipo e teor dos agregados utilizados alteram significativamente a resistividade do concreto.

Portanto, é notória a influência de cada variável para os resultados finais de resistividade elétrica, onde cada variável participa e é importante durante todo o processo de confecção e desempenho das misturas.

#### 5.2.5. Penetração acelerada de íons cloreto

BERTOLINI (2010), afirmou que além das condições de exposição da estrutura, a penetração de cloretos no concreto é influenciada por algumas propriedades, microestrutura do concreto e por mecanismos de transporte das soluções do cloreto tais como: absorção capilar, difusão, permeação e migração. A seguir são apresentados na tabela 27, os valores das cargas passantes em Coulombs (Q), durante o ensaio de 6 horas. Foram produzidos 3 corpos de prova para cada tipo de mistura, onde os resultados da tabela são a média destes em cada mistura.

Tabela 27- Valores das cargas passantes em Coulombs (q) para todas as misturas.

MISTURAS	63 DIAS			91 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF (AGN)	4539,6	3340,71	2455,11	3887,13	3,077,2	2122,65
25% AMC 80% PM	1784,43	1564,75	1468,9	1546,23	1392,8	1304,5
25% AMC 60% PM	1575,09	1485,37	1412,83	1451,1	1369,43	1281,9
25% AMC 40% PM	1488,19	1365,22	1212,15	1268,2	1214,44	1097,89
12,5% AMC 80% PM	3565,8	2938,9	2384,6	3169,54	2414,6	1977,3
12,5% AMC 60% PM	2775,88	2621,62	2243,69	2344,3	2122,1	1688,7
12,5% AMC 40% PM	1916,76	1610,11	1416,76	1792,3	1491,7	1281,1

Na análise direta da tabela, é possível perceber que todas as misturas com substituição do agregado natural pelo agregado miúdo cerâmico, apresentaram melhora na resistência a penetração de íons cloretos na sua microestrutura, ou seja, as misturas de referência apresentaram maior carga

passante de íons cloretos do que as misturas com agregado reciclado cerâmico, para todas as misturas em todas as idades.

A partir de uma análise geral sobre os resultados de carga passante, ao se comparar com os limites de risco estabelecidos pela ASTM C1202, notou-se que todos os concretos que continham AMC, diminuem bastante o risco de penetração de íons cloretos, sendo que, quanto maior a taxa de substituição, menores os valores de penetração de cloretos no concreto. Apesar dos menores valores para as misturas com AMC, as misturas com 12,5% apresentaram a maioria dos valores na faixa de risco moderado, enquanto que as misturas com 25% apresentaram valores na faixa de risco baixo. A seguir na tabela 28, para uma visualização mais aberta dos valores, é mostrada a proporção entre os valores das misturas com AMC e as misturas de referência.

Tabela 28- Proporção das cargas passantes nas misturas para penetração de cloretos.

MISTURAS	63 DIAS			91 DIAS		
	0,65	0,55	0,45	0,65	0,55	0,45
REF (AGN)	1	1	1	1	1	1
25% AMC 80% PM	0,39	0,46	0,59	0,39	0,45	0,61
25% AMC 60% PM	0,34	0,44	0,57	0,37	0,44	0,6
25% AMC 40% PM	0,32	0,4	0,49	0,32	0,39	0,51
12,5% AMC 80% PM	0,78	0,87	0,97	0,81	0,78	0,93
12,5% AMC 60% PM	0,61	0,78	0,91	0,6	0,68	0,79
12,5% AMC 40% PM	0,42	0,48	0,57	0,46	0,48	0,6

Nesta tabela, é possível visualizar melhor os resultados pelos valores proporcionais unitários, e ratificar que quanto maior a porcentagem de AMC nas misturas, menores os resultados de cargas passantes, ou seja, houve melhora desta propriedade para o concreto reciclado. VIEIRA (2013), concluiu em seu trabalho que os resultados foram melhores para esta propriedade, também para substituições mais baixas (20%) de agregado miúdo cerâmico pelo agregado natural. Este fato também foi observado por ZHUTOVSKY e KOVLER (2012).

### 5.2.5.1. Influência do teor de AMC, idade, taxa de pré-molhagem e relação a/c na penetração de íons cloreto.

Com a finalidade de avaliar as interações entre as variáveis taxa de saturação, relação a/c e idade nas misturas com AMC, e o grau de influência dessas variáveis nas cargas passantes, foi feita uma análise ANOVA apresentado a seguir na tabela 29.

Tabela 29- ANOVA das variáveis analisadas na penetração de cloretos das misturas com AMC.

#### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de molhagem	2970253	2	1485127	4,83616	0,01439	5,312029
Relação a/c	2264007	2	1132004	2,46416	0,099315	5,247894
Idade	593649,7	1	593649,7	1,613371	0,212642	4,130018
Teor de AMRC	30329784	2	15164892	40,52291	2,914E-11	5,04721

Na análise da variância ANOVA, deve-se desconsiderar qualquer semelhança ou igualdade entre os valores de penetração de íons cloreto para as diferentes taxas de substituição do AMRC e o concreto de referência, uma vez que, o valor de “p” é inferior ao valor de 0,01 adotado. Logo, isso mostra a grande influência das taxas de substituição na análise desta variável, sendo esta, a variável de maior influência nas misturas em relação à penetração de cloretos neste trabalho.

Também, conclui-se que em se tratando das variáveis taxa de pré-molhagem, relação a/c e idade, todas elas apresentaram uma boa significância na influência da durabilidade em relação da penetração de cloretos nas misturas com AMC, onde se percebeu a interação destas variáveis nas misturas, mostrando um melhor desempenho em relação às misturas de referência. Nas misturas com AMC, constata-se que quanto maior foi a taxa de substituição do agregado natural pelo AMC, menor a carga passante, ou seja, maior a capacidade de resistir a penetração de cloretos. A seguir é mostrada a influência da variável “idade” na figura 31.

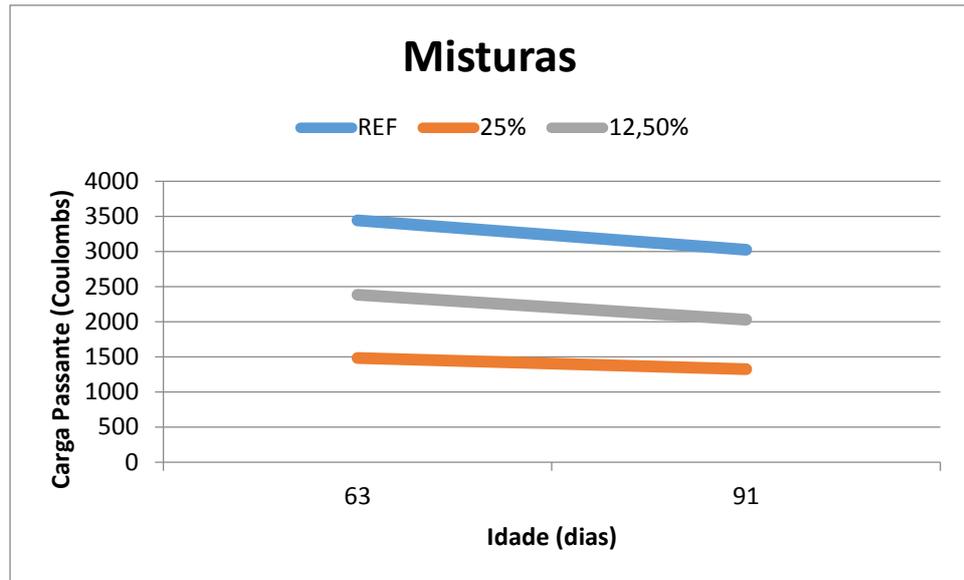


Figura 31- Influência da variável “idade” na penetração de cloretos.

Analisando a figura 31, é possível perceber que todas as misturas apresentaram valores médios de carga mais baixos aos 91 dias em relação aos 63 dias, onde a mistura de referência encontra-se numa faixa maior de carga, seguido das misturas com 12,5% de substituição numa faixa intermediária e as misturas com 25% de substituição apresentando valores médios mais baixos. Pode-se notar ainda uma queda considerável nos valores das misturas de referência e as misturas com 12,5% de substituição na idade de 91 dias, enquanto que para as misturas com 25% de substituição houve uma queda dos valores de carga, mas bem mais moderado. Na figura 32, é mostrada a influência da taxa de pré-molhagem nas misturas.

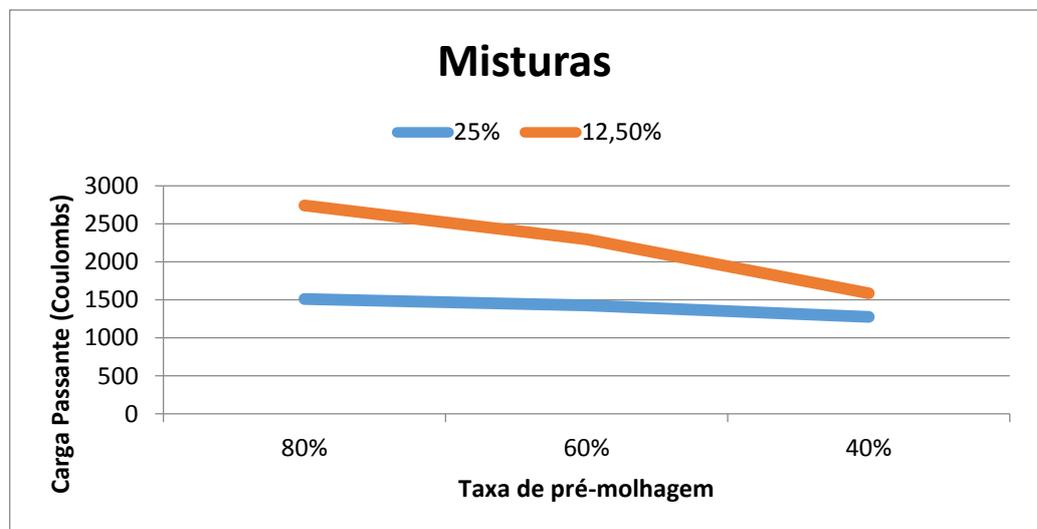


Figura 32- Influência da variável “taxa de pré-molhagem” na penetração de cloretos.

No figura 32 ,nota-se que as misturas com 12,5% apresentaram valores de carga superiores às misturas com 25% de substituição em todas as taxas de pré-molhagem, apresentando uma ligeira semelhança para 40% de taxa de pré-molhagem, mas ainda assim com uma considerável melhora para as misturas com 25% de substituição. Esta queda de valores para as misturas com 12,5% de AMC, pode ser explicada pelo melhor desempenho do concreto em menores quantidades de agregado reciclado juntamente com a baixa quantidade de água de pré-molhagem. Logo, a maior quantidade de AMC nas misturas com 25% de substituição, podem ter ocasionado uma maior presença de poros na estrutura destas misturas, contribuindo para a difusão de cloretos. A seguir na figura 33, é mostrado o comportamento das misturas em função da relação a/c.

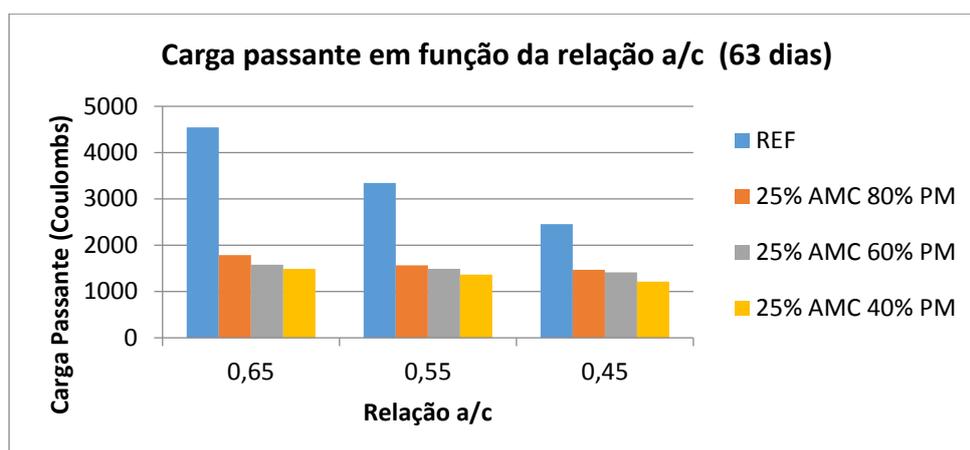


Figura 33- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 63 dias nas misturas com 25% de substituição.

Na figura 33, nota-se que aos 63 dias a mistura de referência apresenta valores muito superiores às misturas com 25% de AMRC, em todas as relações a/c, mostrando a eficácia deste teor para o concreto. Pode-se perceber também que não houve grande diferença de valores entre a misturas com relação às taxas de pré-molhagem, mostrando que não houve tanta influência desta, nas misturas com 25% de substituição.

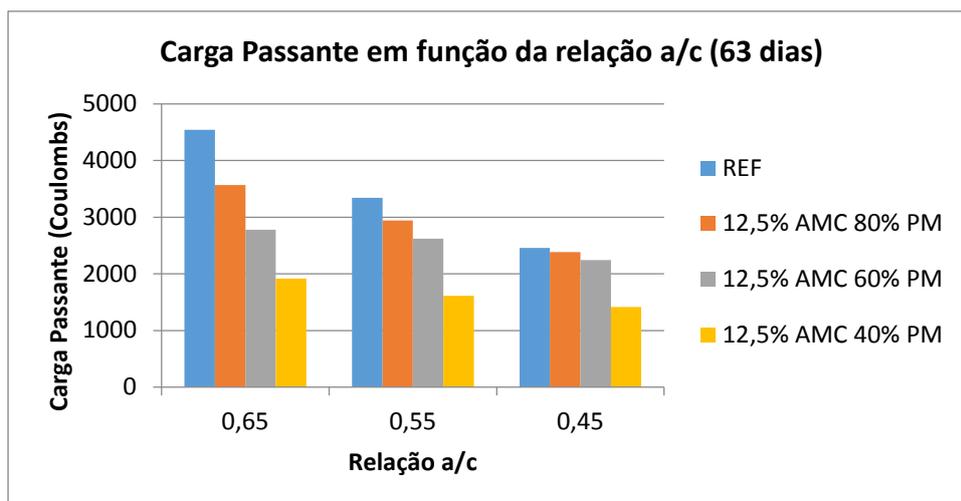


Figura 34- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 63 dias nas misturas com 12,5% de substituição.

Na figura 34, nota-se que as misturas já apresentam valores mais semelhantes em função da relação a/c, tendo em vista, a diminuição da taxa de substituição para 12,5%. Ainda é possível perceber uma considerável queda dos valores de carga a medida que diminui-se os valores da relação a/c. Nas relações de 0,65 e 0,55 as quedas de valores se deram de forma proporcional, entretanto, nas misturas de relação 0,45 as quedas de valores se deram de forma inconstante, de tal forma que houve uma certa equivalência de valores entre as misturas de referência, 12,5% AMC 80% PM e 12,5% 60% PM. Tal fato pode ser explicado pela queda da taxa de substituição do AMC não favorecendo a compacidade das misturas, como nas misturas com 25% AMC.

LEVY (2001), constatou que quando substituiu até 20% de agregado natural por agregado miúdo reciclado cerâmico, obteve uma redução de 30% na concentração de cloretos. O autor afirma que as causas foram a granulometria do agregado e sua qualidade, ele ainda afirma que até 20% de substituição há um crescimento da resistência a penetração de cloretos, a partir deste valor existe uma queda crescente nesta resistência. Este fato, pode também explicar a menor resistência a penetração de cloretos das misturas com 12,5% de AMC. Porém, diferentemente do trabalho de LEVY (2001), este trabalho mostra que porcentagens maiores de substituição do agregado miúdo cerâmico, podem melhorar as condições do concreto nesta propriedade.

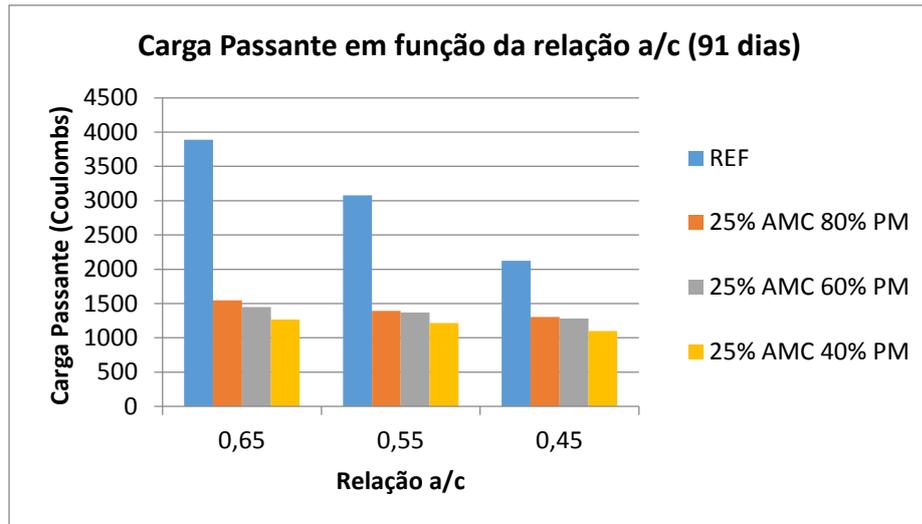


Figura 35- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 91 dias nas misturas com 25% de substituição.

Na análise da figura 35, constatou-se que houve uma queda de valores de carga passante em todas as misturas em relação as mesmas misturas aos 63 dias, sendo que todas as misturas com AMC e de referência seguiram a mesma proporção da queda de valores em relação a idade anterior. É importante notar também as misturas com AMC apresentaram pouca diferença de valores quando analisa-se as relações a/c, ficando basicamente na mesma faixa de valores, apesar de apresentarem valores distintos.

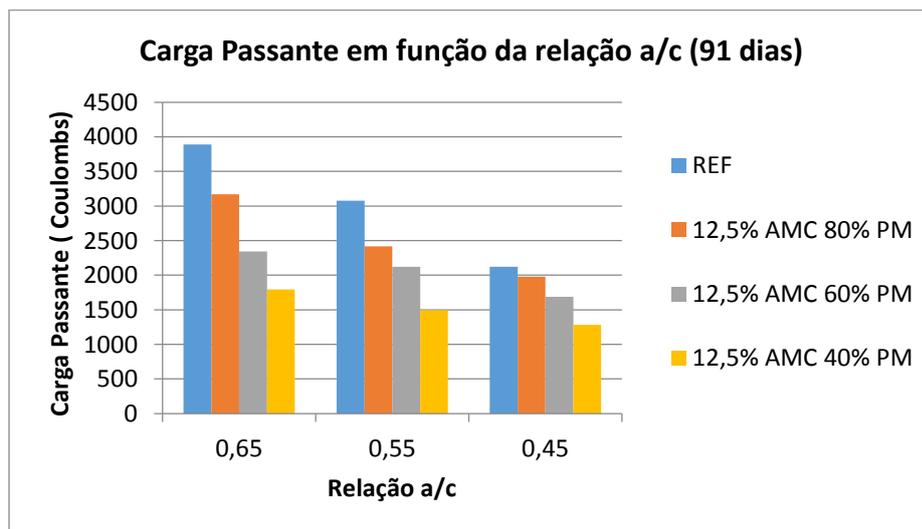


Figura 36- influência da variável “relação a/c” na penetração de cloretos aos 91 dias nas misturas com 12,5% de substituição.

Foi constatado nesta figura 36, que também houve uma queda nos valores de forma geral, e a proporção entre os valores das misturas em cada relação a/c não mudou de forma significativa, com exceção das misturas na

relação a/c igual a 0,45; onde a semelhança entre os valores de carga encontrados na idade de 63 dias sofreu pequenas mudanças para a idade de 91 dias, onde é possível ver uma diferença maior dos níveis de carga encontrado entre os tipos de mistura. Este fato mostra que as diferentes taxas de saturação ainda exercem influência nas misturas mesmo após as maiores idades.

Analisando as figuras mostradas, de um modo geral, é possível perceber a grande influência do AMC nas propriedades do concreto, e em particular no ensaio de penetração de cloretos, onde as misturas de referência são claramente mais suscetíveis ao ataque de cloretos do que as misturas com substituições com AMC. Houve uma redução em média de até 57% nos valores de carga passante para as misturas com 25% de substituição e de 31% para as misturas 12,5%, aos 63 dias. Na idade de 91 dias esses valores foram de 56% para as misturas com 25% de substituição e de 33% para as misturas com 12,5% de substituição.

ETXEBERRIA e VEGAS (2015), observaram melhores resultados para os concretos com AMC em propriedades como resistência, penetração de íons cloreto em relação ao de referência e resultados mais baixos de absorção capilar em relação ao concreto referência, do mesmo modo que o encontrado neste trabalho. De modo geral, levando-se em consideração apenas as misturas que alcançaram o abatimento requerido, destacaram-se três, que obtiveram os melhores resultados em todas as propriedades estudadas, dentre elas: 25%AMC 60%PM e relação a/c igual a 0,55 e 0,45; e a mistura 12,5%AMC 40%PM e relação a/c igual a 0,55. CORDEIRO (2013), afirma que o melhor teor de pré-molhagem para agregados graúdos reciclados de concreto é de 80%, contudo, neste trabalho verificou-se que as misturas com 60% funcionaram melhor para o agregado miúdo cerâmico. Com relação à execução deste tipo de concreto em obras, é executável, observando-se os cuidados de armazenamento e pré-molhagem do agregado cerâmico para produção dos concretos, preferindo-se as relações a/c crescentes de 0,55 e valores de pré-molhagem de 60%, devido à tendência de apresentar pouca trabalhabilidade com este tipo de agregado.

## 6. CONCLUSÕES

Com a finalização do trabalho, verificou-se que o mesmo atingiu os objetivos propostos por ele no início, ou seja, conseguiu-se avaliar os concretos que foram produzidos utilizando agregados miúdos de origem cerâmica, com o uso de diferentes teores de pré-molhagem. Essa avaliação foi em nível de durabilidade nas propriedades de absorção por capilaridade, resistividade elétrica, carbonatação e penetração de íon cloreto. Também se teve que ele conseguiu atingir os objetivos específicos, tais como: avaliou-se a influência do agregado miúdo reciclado cerâmico na trabalhabilidade; conseguiu avaliar os teores de substituição do agregado natural pelo cerâmico, visando definir os teores mais adequados para o uso deste material; conseguiu-se avaliar a influência da pré-molhagem de água do agregado reciclado, bem como, a influência da relação água/cimento e idade neste tipo de concreto com agregado reciclado cerâmico. Por último conseguiu-se fornecer ao meio técnico informações para o estudo mais profundo deste tipo de concreto com agregado miúdo reciclado cerâmico.

Tendo alcançado esses objetivos, teve-se algumas considerações a respeito dos resultados dos ensaios realizados, expostos a seguir:

- Para o **concreto no estado fresco**, a avaliação da **trabalhabilidade** mostrou ser influenciada por todas as variáveis deste trabalho.
  - Em relação à **taxa de molhagem**, o abatimento foi maior quanto maior foi a taxa e vice-versa. As misturas com 40% de saturação apresentaram os menores valores de abatimento em relação à mistura de referência, onde alguns casos como nas misturas 25% AMC 40% PM e relação a/c igual a 0,55 e 0,45 e na mistura 12,5% AMC 40% PM e relação a/c igual a 0,45; os valores de abatimento ficaram abaixo da tolerância de 60 mm. As misturas com 80% apresentaram valores dentro da faixa de (80 mm  $\pm$  20 mm), com exceção da mistura 25% AMRC 80% PM e relação a/c igual a 0,65, a qual apresentou o valor acima da tolerância de 100mm.

- **A técnica de pré-molhagem** dos agregados mostrou-se procedente em sua aplicação, tendo em vista a praticidade e a capacidade de evitar a perda excessiva de trabalhabilidade das misturas. Muito embora algumas delas não tenham apresentados valores satisfatórios em relação a trabalhabilidade, mas não por eficiência da técnica e sim por ajustes nos valores das taxas de pré-molhagem.
  
- Para o **concreto no estado endurecido**, em relação à **resistência à compressão axial**, foi observado que para este ensaio diversos fatores tiveram influência no resultado final, entretanto, as características do agregado cerâmico reciclado são a principal causa para estes resultados. Pode-se perceber que, provavelmente, a porosidade do agregado cerâmico em conjunto com sua elevada finura contribuiu para os ganhos de resistência das misturas, tendo em vista, a capacidade desse agregado de absorver a pasta cimentícia em sua estrutura porosa, proporcionando assim uma aderência mais forte entre agregado e a matriz cimentícia. Existe ainda a capacidade de adsorção das partículas mais finas, tendo em vista a possível ocorrência do efeito pozolânico nas misturas com agregado cerâmico, e ainda o efeito filler de preenchimento dos poros dessas misturas. Portanto, pode-se constatar que as misturas com 25% AMC apresentaram os maiores valores de resistência à compressão em conjunto com a mistura 12,5% AMRC 40% PM, seguido das demais misturas com 12,5% AMC, e por último as misturas de referência.
- Com relação à **absorção por capilaridade**, analisando os resultados experimentais e de acordo com as avaliações estatísticas estabelecidas das variáveis foi concluído:
  - Quanto à **relação a/c** das misturas, dentro da expectativa, as relações água/cimento influenciaram de forma que quanto maior esta relação, maior também os valores de absorção capilar das misturas.

- Para as **idades**, também foi constatado a influência desta variável para misturas, sendo que de 28 dias para 63 dias, foi observado que houve uma queda de valores de absorção para todas as misturas.
  - Com relação ao **teor de substituição do AMC**, foi possível concluir que os maiores valores de substituição aumentaram o grau de absorção das misturas, isso deve principalmente pela porosidade do agregado cerâmico, e pela diminuição do diâmetro dos poros, fato que intensifica a força de absorção do concreto. As misturas com 12,5% de AMC apresentaram mais favoráveis do que as misturas de referência, mostrando que os teores mais baixos funcionam de forma mais eficaz contra a absorção capilar do concreto.
  - Acerca da **taxa de molhagem**, esta apesar da sua influência na absorção das misturas, não foi a variável de maior destaque para esta propriedade. No comportamento das misturas, tanto para as misturas com 25% de AMC, quanto para 12,5% AMC, quanto menor o valor da taxa, menor também os valores de absorção capilar destas misturas. As misturas com 25% AMC 80% PM apresentaram em todas as relações a/c, valores maiores que a mistura de referência. Todas as outras misturas apresentaram valores inferiores ao de referência.
- Para a **carbonatação acelerada do concreto**, após análise dos resultados experimentais e estatísticos das variáveis pode-se concluir:
- Em relação ao **teor de substituição**, foi constatado que quanto maior o teor de substituição maior foi o avanço de carbonatação em todas as misturas, com exceção da mistura 12,5% AMC 80% PM 0,65 a/c, onde o valor da frente de carbonatação foi maior que das misturas 25% AMC com 60% e 40% PM na mesma relação a/c. As demais misturas com 12,5% AMC obtiveram os menores avanços da frente de carbonatação entre todas as misturas.

- Para a **taxa de molhagem**, foi nítida a sua significância, onde, pode-se observar que para as misturas com 80% de saturação, foram encontrados os maiores valores de avanço da carbonatação, com exceção das misturas de referência.
  - Na **relação água/cimento**, o comportamento das misturas ocorreu de modo esperado, onde quanto menor a quantidade de água na mistura menor também o avanço da frente de carbonatação. Apenas a mistura 12,5% AMC 80% na relação a/c igual 0,65 apresentou um comportamento fora do esperado.
  - Nas **idades** os avanços da frente de carbonatação já eram esperados, sendo que a maior parte do avanço da profundidade de carbonatação se deu até os 7 dias.
  - Pode-se observar principalmente que quando da presença de agregado miúdo cerâmico, as variáveis mais influentes na estrutura da matriz cimentícia são a quantidade de agregado cerâmico utilizado, pois disso depende também o grau de porosidade inserido e a taxa de saturação.
- Na **resistividade elétrica**, analisando os dados experimentais e estatístico das variáveis chegou-se à conclusão:
- O **teor de AMC** apresentou a variável de maior significância, tendo em vista que todas as misturas com este resíduo apresentaram valores de resistividade maiores que das misturas de referência, onde à medida que o teor foi maior, maior também a resistividade do concreto, mostrando ótimo desempenho para esta propriedade.
  - Na avaliação da **taxa de molhagem**, foi constatada a grande significância desta variável para a resistividade elétrica, sendo que, as taxas de 60% e 40% apresentaram os melhores valores de resistividade elétrica.

- Com relação a **idade**, mostrou ser significativa em influência nas misturas para esta propriedade, onde a resistividade aumentou com o avanço da idade de 28 para 63 dias.
  - A relação **água/cimento** teve um comportamento esperado, onde a maior quantidade de água na mistura diminuiu a resistividade elétrica dos concretos. Mostrou também, ser a variável de maior significância para resistividade elétrica das misturas.
- Em relação à **penetração acelerada de íons cloretos**, segundo a análise dos resultados experimentais e estatísticos das variáveis chegou-se as seguintes conclusões:
- Quanto ao **teor de AMC**, esta variável mostrou grande significância na influência das misturas, uma vez que, todas as misturas com AMC apresentaram valores de carga passante menores que as misturas de referência. As misturas com 25% AMRC apresentaram os melhores resultados para a penetração de cloretos.
  - Quanto às **taxas de molhagem**, também apresentaram significância para as misturas, sendo que, para taxa de 80% nas misturas com 12,5% AMC, os valores de carga passante sofreram considerável aumento. A relação entre esta variável e os valores de carga foi diretamente proporcional.
  - A variável **idade** mostrou-se significativa nas misturas, onde foi notória a queda de valores de carga passante com o avanço da idade de 63 para 91 dias.
  - Para a **relação água/cimento**, quanto maior este fator, maior a carga passante encontrada nas misturas. Principalmente nas misturas com 12,5% AMC.

Apesar das melhoras consideráveis na utilização do agregado reciclado cerâmico, algumas pesquisas mostram que esse fato, só acontece quando há a substituição do agregado reciclado em porcentagens baixas de substituição (MEDINA, FRÍAS e ROJAS, 2012) e (VIEIRA, 2013). Em comparação ao

trabalho aqui feito, MANDAVI et al. (2015) observaram que houve perda da trabalhabilidade do concreto a medida em que aumentou-se o teor de substituição do AMC pelo agregado natural, a resistência à compressão axial aumentou em média 40% em relação à mistura referência e os valores de resistência à penetração de cloretos mostraram-se superiores quando comparados à referência.

## 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os princípios do desenvolvimento sustentável e das construções verdes tem se inserido na indústria da construção civil de forma acelerada nos últimos anos, onde a indústria do concreto, em particular, tem buscado melhorar a imagem de consumidor voraz dos recursos naturais, onde não havia compromisso com a sustentabilidade.

A ideia de utilizar materiais reciclados na produção do concreto era desconhecida há alguns anos, agora os produtores sabem que eles precisam mudar. Como uma das ferramentas e estratégias para solucionar os problemas ambientais existe a utilização de materiais reciclados em substituição aos recursos naturais utilizados em grande escala, melhorando durabilidade, desempenho do concreto, além da diminuição do consumo de energia. Esses conceitos têm sido adotados em grandes países hoje, e acredita-se que a indústria do concreto tem se posicionado com sucesso, de forma a ajudar massivamente nesse sentido, apresentando ferramentas como neste trabalho.

Num contexto geral, ainda são poucas as pesquisas e a profundidade do conhecimento quando se trata da aplicação de agregados cerâmicos em concreto, principalmente como agregado miúdo, além de resultados, por vezes, não favorável com relação à durabilidade. Existem também os resultados divergentes, devido à falta de normas e padronização da utilização dos agregados cerâmicos nesse sentido, principalmente em relação à técnica de saturação dos agregados reciclados utilizados pelos autores acerca deste tema especificamente.

Portanto, apesar da necessidade de ajustes ideais de taxa de pré-molhagem e teor de substituição, este trabalho indica a viabilidade do uso de

agregado miúdo cerâmico reciclado, como agregado para produção de concreto, até mesmo para fins estruturais. Apesar do abatimento não ter sido satisfatório em algumas misturas, o comportamento mecânico dos concretos com este agregado cerâmico apresentou melhor desempenho, principalmente para o teor de 25%. Também para as demais propriedades, a utilização do AMC, mostrou-se viável, salvo algumas poucas misturas que dependendo da finalidade do seu uso requereriam cuidados especiais para sua aplicação.

Todas as misturas com AMRC apresentaram valores superiores em relação à qualidade na durabilidade dos concretos de referência em todas as propriedades analisadas, com exceção na propriedade de absorção capilar nas misturas com teores de 25% de AMRC. Sendo que, de modo geral, as misturas com 60% de pré-molhagem apresentaram em sua maioria os melhores resultados.

Chegou-se a definição de que valores de saturação muito altos como 80% e muito baixos como 40%, não são muito aconselháveis, a não ser que, se faça uso de aditivos ou adição para correção da trabalhabilidade desses concretos. Tendo em vista também que valores altos de saturação podem ocasionar perda de resistência e tornar vulnerável ao ataque patogênico a estrutura do concreto, através do aumento da porosidade, enquanto que, os mais baixos podem ocasionar a falta de água para que ocorra uma mistura homogênea e uma hidratação ideal da pasta de cimento.

De modo geral, o uso do agregado cerâmico neste trabalho, pode ter ocasionado o refinamento do sistema de poros do concreto, aumentando o volume de poros capilares e diminuindo a quantidade de macro poros. Provavelmente houve uma compactação da zona de transição, diminuindo a porosidade entre o agregado cerâmico e a pasta cimentícia, este fato, também justificaria a obtenção desses resultados favoráveis.

## 6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de expandir e melhorar o arcabouço de conhecimento acerca do agregado miúdo reciclado cerâmico e sua incorporação na produção de concreto, são sugeridos alguns tópicos para futuros trabalhos:

- Análise de pozolanicidade dos agregados miúdos reciclados de cerâmica;
- Verificação de novas taxas de substituição dos agregados naturais por AMRC entre 0 e 50%;
- Experimentar taxas de pré-molhagem em torno de 50 a 70%;
- Avaliação da microestrutura dos concretos com AMRC, principalmente do sistema de poros (porosimetria) e zonas de transição através do MEV.
- Utilização de superplastificantes para taxas de saturação baixas;
- Avaliação do uso de AMRC em argamassas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 3ª Edição, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 - Cimento Portland Comum**, Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_. ABNT NBR 10004:2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Comitê: ABNT/CEE Comissão de Estudo Especial. 71 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR 15112/2004 – **Resíduos de construção e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto**. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 7 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR15113/2004 – **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto**, implantação e operação. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR15114/2004 – **Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Comitê: Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR 15115/2004 – **Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 10 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR 15116/2004 – **Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural – Requisitos**. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

\_\_\_\_. ABNT NBR 45/2006 Agregados - **Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 8 páginas, 2006.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 52/2009. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 Páginas, 2009.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 5739:2007 - Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT **NBR NM 248/2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 Páginas, 2003.

\_\_\_\_. ABNT NBR 9779:1995 - **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção da água por capilaridade – Método de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT NBR 5738:2008 - **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 5733 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial,** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 12654 - Controle tecnológico de materiais componentes do concreto,** Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. ABNT**NBR 12655 -Concreto – Preparo controle e recebimento,** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 8953 - Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência,** Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. ABNT **NBR 7211 -Agregados para concreto- Especificação,** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_. ABNT **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem,** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_. ABNT**NBR NM 53 -Agregado graúdo – Determinação da massa específica,** massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_. ABNT **NBR NM 67 -Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio,** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_. ABNT **NBR NM 23– Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.**Rio de Janeiro, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. **ASTM G57.** In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-07:** Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201 Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201**. ACI Materials Journal, v. 88, n. 5, p. 544-82, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201**. 2008. p. 1-53.

ABRELPE (2013) – **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais– ABRELPE**. São Paulo – SP.

ACI COMMITTEE 555. **Removal and reuse of hardened concrete**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute Report ACI; 2001.

ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Cartilha ambiental da cerâmica vermelha**, 2014.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1.ed. São Paulo: Pini, p.667,2000.

ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo, 1997.

ÂNGULO, S. C. **Produção de Concretos de Agregados Reciclados**. Londrina, 1998.

ALBUQUERQUE, A. S. **Agregados**. In:BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. São Paulo: LCT, 6ª Edição, V.1, p.63-120, 2003.

ALVES, A. P. B. **Resíduo de Construção e demolição da cidade de Macaé**. XVI Jornada de Iniciação científica – CETEM.

ALVES, A. V., VIEIRA, T. F., de BRITO, J., CORREIA, J. R. **Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates**. Construction and building materials, 2014.

ALTHEMAN, D. **Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho da construção civil**, Campinas, 2002.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

AZEVEDO, M. A. **Uso de aditivos no concreto**. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção 1**.LCT, 6ª Edição, V.1, p.135-185, 2003.

BARRITT, J. **The evolution of recycled aggregates for concrete.** *Concrete Engineering International*, 2006.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria – Rio Grande do Sul, 2008.

Basheer L, Kroop J, Cleland DL. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.** *Construct Build Mater* 2001.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

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

CABRAL et al. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha.**

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

CACHIM, P. **Mechanical properties of brick aggregate concrete.** *Construction and building materials*. Vol 23, p. 1292-97, 2009.

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 41, Salvador, 1999.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations.** *Materials and Structures*, v. 42, n. 4, p. 515 – 525, 2009.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. **Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete.** *Construction and Build Materials*, v. 25, p. 3768-72, 2011.

CINCOTTO, A. M.; FILHO, J. H.; PILEGGI, R. G. **Técnicas de caracterização reológica de concretos.** *Revista concreto*, São Paulo, n. 47, p. 108-123, jul./set. 2007.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, 17 jul 2002.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORDEIRO, G. C. et al. **Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas**. In: 44º Congresso Brasileiro – Instituto Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

CORNELLI, R.; SCHNEIDER, V. E.; HILLIG, E.; POLETTO, M. **Caracterização de resíduos de construção e demolição (RCD) em dois municípios da serra Gaúcha**. XXI Congresso de iniciação científica e tecnológica em engenharia – CRICTE, 2006.

COUTINHO, A. **Produção e propriedades do concreto**, vol. III. Lisbon, Portugal: LNEC; 1994.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria - Rio Grande do Sul, 2010.

DAFICO, D. A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland** - Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

DE PAUW C. **Fragmentation and recycling of reinforced concrete – some research results, adhesion problems in the recycling of concrete**. NATO conference series IV (materials science). New York: Plenum Press, p. 331; 1981.

DE JUAN, M.S, GUTIÉRREZ, P.A. **INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATE QUALITY ON CONCRETE PROPERTIES**. CEDEX, SPAIN.

ESBACH, O. E.; SOUDERS, M. **Handbook of engineering Fundamentals**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

ETXEBERRIA, M., VEGAS, I. **Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed RA on hardened properties of concrete**. Magazine of Concrete Research, 2015.

EVANGELISTA, L., de BRITO, J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2007.

FLACH, C. E. **Estimativa da geração de resíduos de construção e demolição em uma cidade na serra gaúcha**. X Salão de iniciação científica – PUCRS, 2009.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da cinza da casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. Dissertação de mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, 2013.

FERNANDES, M., SOUSA, A., DIAS, A. **Environmental impact and emissions trade. Ceramic industry. A case study**. Portuguese Association of Ceramic Industry. APICER; 2004.

GIROTTI, E. M., DE PAOLI, M. A. **Transporte de massa em polímeros intrinsecamente condutores: importância, técnicas e modelos teóricos**. Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas, 1998.

GJØRV, O. E.; VENNESLAND, O., EL-BUSIADY, A. H. S. **Electrical Resistivity of Concrete in Ocean**. Ninth Annual Offshore Technology Conference, OTC Paper 2803, p. 581, 1977.

GOMES, C.F. **Argilas: o que são e para que servem**. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1988.

HANSEN, T.C., **Recycling of demolished concrete and masonry**. RILEM report 6. London: Chapman and Hall; 1992.

HANSEN, T.C., LAURITZEN, E.K. **Concrete waste in a global perspective, recycling concrete and other materials for sustainable development**. American Concrete Institute; 2004. p. 35–45.

HELENE, P.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: PINI, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo. 1993. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**, São Paulo: Pini, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Aplicação de cacos cerâmicos: Estudo do IPT analisa formas de uso do resíduo de cerâmica vermelha, visando reduzir passivos ambientais.** São Paulo, 2014. Disponível em: [http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=780](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=780)

ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Vol 2, 2005.

JACKIEWICZ, W., ZALEGOWSKI, K., GARBACZ, A., BISSONETTE, B. **Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers.** 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD 2015).

JIMÉNEZ, J. R., AYUSO, J., LÓPEZ, M., FERNÁNDEZ, J. M., BRITO, J. DE. **Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing.** Construction and Building Materials, 2013.

JÚNIOR, N.B.C. **Cartilha de gerenciamento de resíduos sólidos para construção civil.** SINDUSCON-MG, 2005. 38p.

JÚNIOR, G.S.N. e CHAGAS, S.V.M. **Mapeamento dos agregados usados na região metropolitana de Belém na produção do concreto** - Trabalho de conclusão de curso, Universidade federal do Pará, Belém, 2007.

KENAI, S. DEBIEB, F, **The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in Concrete,** Construction and Building Materials, 2007.

KHATIB, J M. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.** Cement and Concrete Research. 2005.

KAZMIERCZAK, C.S. **Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa.** Estudos tecnológicos - Vol. 3, nº 1:47-58 (Jan/Jun 2007)

KASAI, Y. **Recent trends in recycling of concrete waste and use of recycled aggregate concrete in Japan, recycling concrete and other materials for sustainable development.** American Concrete Institute; 2004. p. 11–34.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2002.

LAMPACHER, B.J., BLIGHT, GE. **Permeability and sorptions properties of mature near-surface concrete.** Journal Civil Engineering, 1998.

LAVAT, A., TREZZA, M., POGGI, M. **Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture.** Waste Manage, 2009.

LAY, J. **European standardization of recycled concrete.** Concrete Engineering International, 2006.

LEITE, M.B, **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado. UFRGS, 2001.

LEVY, S. M. **“Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria”**, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, EPUSP, São Paulo, 2001.

LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. **Chimical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate.** West Management, 2007.

LINDVALL, A. **Chloride ingress data from field and laboratory exposure – Influence of salinity and temperature.** Cement and Concrete composites, v.29, p. 89, 2007.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto –** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MANDAVI, H. K., SRIVASTAVA, V., AGARVAL, V. C. **Durability of Concrete with Ceramic Waste as Fine Aggregate Replacement.** International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 2015.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade concretos com proteção superficial frente a ação de íons cloretos.** Universidade de São Paulo Escola Politécnica, 2008.

MEDINA, C., FRÍAS, M., SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. **Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate.** Construction and Buildings Materials, 2012.

MEHTA, P.K. **Advancements in concrete technology In: Journal of advanced concrete technology**, p.70-76, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – estruturas, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – microestruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008.

METHA, P.K. **Reducing the environment impact of concrete**. Concrete can be durable and environmentally friendly. Concrete International 2001;10.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry**. Cement and Concrete Composite, 2009.

NACERI, A., HAMINA, M. **Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar**. Waste Manage, 2009.

NAVARRO, R. F. **Fundamentos da reologia de polímeros**. Caxias do Sul: EDUCS, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

PAIXÃO, S. O. **Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2004.

PRADO, C. M. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Sergipe, 2011.

PRINCIGALLO, A., BREUGEL, K. VAN., LEVITA, GIOVANNI. **Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes**. Cement and Concrete Research v.33, p.1755 – 1763, 2003.

PEDROZO, R. F. E. **influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

PEREIRA, L.O.M., TAVARES. A.N. **Proposta para gestão integrada dos resíduos sólidos em Belém**. ABES 19º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e ambiental.

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

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. **Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity.** Cement & Concrete Composites, v.24 p. 427-35, 2002.

POON, C. S. **Management of construction and demolition waste.** Waste Management, 2007.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BOHM, M. **Competition of several carbonation reactions in concrete. A parametric study.** Cement and Concrete Research, v. 38, p. 1385 – 1393, 2008.

PUCCI, R.B. **Logística de resíduos da construção civil atendendo à resolução CONAMA 307** - Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

PUERTAS, F., GARCIA-DIAZ, I., BARBA, A., GAZULLA, M., PALACIOS, M., GOMEZ, M., et al. **Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production.** Cement Concrete Composites, 2008.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. **Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength.** Construction and Build Materials, v. 25, p. 2472-9, 2011.

REIS, F.J.L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, 2013.

REPETTE, W.L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: Ed. G.C. Isaia, IBRACON, p.1510-1529, 2005.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. **Hardened properties of self consolidating high performance concrete including rice husk ash.** Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 708-17, 2010.

SCHALCH, V., LEITE, W. C. A., FERNANDES JR., J. L., CASTRO, M. C. A. **A.Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.** Disciplina do curso de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento. São Carlos (Apostila), 91 p. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

SCHENINI, P.C.; BAGNATI, A.M.Z; CARDOSO, A.C.F. **Gestão de resíduos da construção civil**. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. COBRAC – UFSC, 2004.

SENISSE, J. A. L.. **Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna**. 2015. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, T.C.R.; FUCALE, S.P.; GUSMÃO, A.D.; FERREIRA; S.R.M. **Estudo da reciclagem do resíduo da construção civil para uso como agregado em estacas de compactação**. Escola Politécnica de Pernambuco, 2009.

SILVA, J; de BRITO. J; VEIGA, M. **Características mecânicas de argamassas com incorporação de agregados reciclados cerâmicos**. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Vol 15, Pg 13-22, 2008.

OZKAN, S., GJOJRV, O. **Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction**.ACI Materials Journal, v. 105, n. 1, Title n. 105 M61. Nov.-Dez., 2008.

SENTHAMARAI, R.M., MANOHARAN, P.D., GOBINATH, D. **Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties**. Construction and Building Materials. 2010.

SILVA, P. C., FERREIRA, R. M., FIGUEIRAS, H. **Medições de resistividade elétrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura**. Encontro Nacional de betão estrutural – BE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

TAYRA,F.,RIBEIRO,H. **Modelos de indicadores de sustentabilidade: síntese e avaliação crítica das principais experiências**. Saúde e sociedade v.15, n.1, p.84-95, jan-abr 2006.

TENÓRIO, J.J.L.; **Avaliação de Propriedades do Concreto produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição visando aplicações Estruturais**.Maceió - 2007.

TEIXEIRA – NETO, E., TEIXEIRA – NETO, A.A. **Modificação química de argilas: Desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado.** Quimica Nova, 32, p. 809, 2009.

TORGAL, F. P., JALALI, S. **Reusing ceramic wastes in concrete.** Construction and building materials, 2010.

VIEIRA, T.F. **Betões com incorporação de agregados finos cerâmicos. Dissertação de mestrado.** Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S.N., DUALIBI FH, J. **Considerações sobre o uso da granulometria como parâmetro de controle de uma argila sedimentar.** Cerâmica Industrial, 10, p 23-26, 2005.

YELTON, R. **Concrete recycling takes off.** The Concrete Producer, 2004.

ZAMPIRON, L. C., DE SOUZA, R. A., OLIVEIRA, A. L. **Utilização de areia de reciclagem proveniente de cerâmica vermelha para a confecção de argamassa de assentamento para alvenaria estrutural.** Instituto Federal de Educação, ciência e tecnologia de Santa Catarina – IFSC, 2009.

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, A.K.; TIN, S.S. **Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) Results for concrete containing mineral admixtures.** ACI Materials Journal, v.97, n.2, pg.221, March-April, 2000.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical resistivity of concrete:** a literature review. R&D Serial No. 2457. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2003.

XIAO, J. FALKNER, H. **Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars.** Construction and Building Materials, 2007.

ZHUTOVSKY, S., KLOVER, K. **Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete.** Cement and Concrete Research, 2012.