



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE  
CONCRETO FRENTE À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALINE TROIAN

SÃO LEOPOLDO 2010

TB845a Troian., Aline  
Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto / Aline Troian. -- 2010.

127 f. : il.; 30cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2010.

Orientadora: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski; Co-Orientador: Prof. Dr.. Claudio de Souza Kazmierczak.

1. Construção civil. 2. Resíduo - Construção - Demolição. 3. Agregado reciclado - Concreto. 4. Resistência - Concreto - Íons cloreto. I. Título. II. Kulakowski, Marlova Piva. III. Kazmierczak., Claudio de Souza.

CDU624

ALINE TROIAN

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE  
CONCRETO FRENTA À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Marlova Piva Kulakowski

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Cláudio de Souza  
Kazmierczak

**Banca examinadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Denise C. C. Dal Molin

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Jane P. Gorninski

**MAIO, 2010.**

## TERMO DE APROVAÇÃO

### “AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO FRENTE À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO”

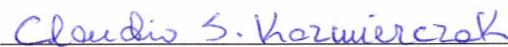
**ALINE TROIAN**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:



Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski  
Orientadora

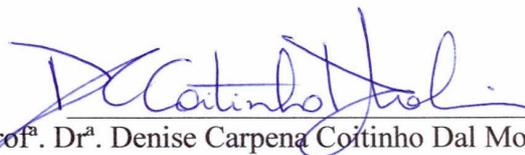


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Coordenador do PPGEC/UNISINOS



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Coorientador

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª. Dr.ª. Denise Carpena Cotinho Dal Molin



Prof.ª. Dr.ª. Jane Proszek Gorninski

SÃO LEOPOLDO, RS – BRASIL  
Maio/2010

*Dedico essa conquista aos meus pais, Luiz e Iraci Troian e ao meu irmão Marlon, por todo amor, compreensão e principalmente por sempre acreditarem em mim, quando era difícil de eu mesma acreditar.*

## **AGRADECIMENTOS**

É com lágrimas nos olhos, mas coração sorridente que deixo aqui registrado estes agradecimentos, que são merecidos a todos que de alguma forma participaram da realização desta conquista.

Primeiramente agradeço a Deus, pela constante presença em minha vida e ter me possibilitado saúde mental para finalizar esta pesquisa.

À minha querida orientadora a professora Marlova Piva Kulakowski, que me guiou e acompanhou durante todo esse tempo, é um exemplo de dedicação e, sobretudo, de amizade.

À minha amada amiga e parceira de tantas alegrias, dificuldades e conquistas minha “dupla” no mestrado, Ana Paula Werle, cuja amizade levarei eternamente em minha vida.

Ao professor Claudio de Souza Kazmierczak, pela sua sabedoria e orientação ao longo de toda pesquisa.

À professora Jane Proszek Gorninski, pelo apoio e contribuição dada ao trabalho.

À professora Andrea Parisi Kern, por ser a minha primeira incentivadora nesta conquista.

Ao professor Marco Aurélio Stumpf González, pelo incentivo ao trabalho e apoio nas análises estatísticas.

Ao professor Carlos Alberto Mendes Moraes, pelo exemplo de figura humana, caráter e profissionalismo.

Aos demais professores pelos ensinamentos recebidos.

Ao Laboratório de Materiais da Engenharia Civil e seus funcionários, por toda a estrutura dada para a realização dos ensaios.

Aos bolsistas de iniciação científica, Ludiero, Jeferson, Ana Cláudia e Maiquel, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Engenharia Mecânica, em especial ao Jackson e ao Matheus.

Ao Laboratório da Engenharia Elétrica, pela ajuda e empréstimo dos equipamentos para a realização de ensaios, em especial ao Iran e ao Maicon.

Aos Laboratórios de Química e da Geoquímica, pela preparação das soluções químicas.

À maquetaria da Arquitetura e Urbanismo, na pessoa do seu João.

Às empresas que gentilmente doaram os materiais para os experimentos, em especial, à SIKA S.A e a Loctite Super Bonder S.A.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e FINEP, pelo financiamento da pesquisa.

Aos meus amigos de fé, Alexandra Blume, Andréia Celso, Tatiana Lovato e Maurício Drobot.

À pessoa do Engenheiro José Luiz Garcias, pela oportunidade e compreensão.

À minha madrinha Deize, por todo o mimo.

Aos meus avós maternos, Oliva e Deocliudes, cujo minha gratidão, respeito e amor serão eternos.

Ao meu irmão Marlon, por toda parceria e amizade de sempre.

Aos meus pais Iraci e Luiz, por toda a dedicação e oportunidades que me proporcionaram ao longo desta vida.

Ao grande amor da minha vida, minha mãe, por todos os terços rezados.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.2	ESTRUTURA DA PESQUISA .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	18
2.1.1	<i>Definição e composição dos RCD</i> .....	18
2.1.2	<i>Reciclagem dos RCD</i> .....	21
2.1.3	<i>Aplicabilidade</i> .....	23
2.2	DURABILIDADE .....	25
2.3	CORROSÃO DE ARMADURAS .....	29
2.3.1	<i>Origem e importância dos íons cloreto no concreto</i> .....	32
2.3.2	<i>Fases dos íons cloreto no concreto</i> .....	33
2.3.3	<i>Taxas admissíveis de íons cloreto no concreto</i> .....	34
2.3.4	<i>Mecanismos de penetração de íons cloreto</i> .....	35
2.3.5	<i>Parâmetros determinantes na penetração de cloretos</i> .....	39
2.4	MÉTODOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	41
2.4.1	<i>Resistência do concreto à penetração de íons cloreto</i> .....	41
2.4.2	<i>Técnicas de Medição Indireta</i> .....	48
2.5	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO .....	51
2.5.1	<i>Propriedades dos Agregados Reciclados</i> .....	51
2.5.2	<i>Penetração de Cloretos em Concretos com Agregado Reciclado</i> .....	57
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>60</b>
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	60
3.1.1	<i>Variáveis de resposta analisadas</i> .....	60
3.1.2	<i>Variáveis de Controle</i> .....	60
3.1.3	<i>Projeto Estatístico</i> .....	61
3.2	MATERIAIS .....	62
3.2.1	<i>Cimento</i> .....	62
3.2.2	<i>Agregado miúdo natural</i> .....	63
3.2.3	<i>Agregado graúdo natural</i> .....	64
3.2.4	<i>Água</i> .....	65
3.2.5	<i>Agregado graúdo reciclado de concreto</i> .....	65
3.2.6	<i>Porosimetria dos agregados reciclados de concreto</i> .....	73
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E CORPOS-DE-PROVA .....	74

3.4	MÉTODOS DE ENSAIO .....	75
3.4.1	<i>Resistência à compressão e à tração</i> .....	75
3.4.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	75
3.4.3	<i>Penetração acelerada de íons cloreto</i> .....	75
3.4.4	<i>Ensaio de absorção de cloretos</i> .....	78
3.4.5	<i>Análise estatística</i> .....	79
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	80
4.1.1	<i>Resistência à compressão</i> .....	80
4.1.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	84
4.2	DURABILIDADE .....	87
4.2.1	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	87
4.2.2	<i>Penetração acelerada de íons cloreto</i> .....	92
4.2.3	<i>Ensaio de absorção de cloretos por capilaridade</i> .....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>104</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo da composição dos RCD (Lovato, 2007). .....	18
Tabela 2 - Exemplo de obras de concreto com agregado reciclado na Holanda.....	24
Tabela 3 - Exemplo de obras de concreto com agregado reciclado na Inglaterra.....	24
Tabela 4 - Algumas obras realizadas na Alemanha com AGR .....	25
Tabela 5 - Limite de norma para o teor total de cloretos.....	35
Tabela 6 - Principais métodos de ensaio à penetração de cloretos (Stanish et.al, 1997).....	50
Tabela 7 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP V- ARI.....	63
Tabela 8 - Características do agregado miúdo.....	64
Tabela 9 - Características do agregado graúdo.....	65
Tabela 10 - Resistências dos ARC para incorporação na nova matriz.....	67
Tabela 11 - Caracterização física dos agregados provenientes da britagem dos concretos. ....	67
Tabela 12 - Ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C1202-07) .....	78
Tabela 13- Resultados das médias de resistência à compressão axial.....	81
Tabela 14- ANOVA dos efeitos dos fatores independentes sobre resistência à compressão..	81
Tabela 15 - Médias dos resultados da resistência à tração por compressão diametral.....	84
Tabela 16- ANOVA dos efeitos dos fatores independentes sobre resistência à tração.....	84
Tabela 17: Anova do modelo para absorção de água por capilaridade .....	89
Tabela 18- Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade .....	90
Tabela 19 - Resultados das médias de carga total passante.....	93
Tabela 20- Anova do modelo para a carga passante .....	93
Tabela 21- Parâmetro das variáveis analisadas para a penetração acelerada de íons cloreto, baseado na carga total passante (ASTM C1202-07). .....	94
Tabela 22- Os resultados das médias de absorção de cloretos por capilaridade .....	99
Tabela 23-ANOVA do modelo para a absorção de cloretos por capilaridade .....	100
Tabela 24- Parâmetro das variáveis analisadas, para a absorção de cloretos.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma do Utilização de RCD na construção civil.....	16
Figura 2 - Composição de RCD em Porto Alegre / RS.....	20
Figura 3 - Composição de RCD em São Leopoldo/RS.....	20
Figura 4 - Composição de RCD em Novo Hamburgo/RS.....	21
Figura 5 - Processo da Cadeia Produtiva dos RCD.....	22
Figura 6 - Parâmetros de avaliação de durabilidade e desempenho de uma estrutura.....	29
Figura 7 - Esquema Simplificado da célula de corrosão (CIB 152, 1984).....	31
Figura 8 - Fases dos cloretos nos concretos (TUUTTI, 1982). ....	33
Figura 9 - Formas de penetração de íons cloreto na estrutura de concreto.....	36
Figura 10 - AASHTO T259 (salt ponding test).....	42
Figura 11 - Sistema do ensaio do Nordtest ( STANISH et.al, 1997).....	43
Figura 12 - AASHTO T277 (ASTM C1202-07) esquema do teste.....	44
Figura 13 - Célula de migração (Tang e Nilson, 1991).....	47
Figura 14 - Representação esquemática do método (STANISH et.al, 1997).....	49
Figura 15 - Matriz de variáveis experimental e ordem de execução dos traços.....	62
Figura 16 - Curva da distribuição granulométrica da areia.....	64
Figura 17 - Diagrama de Dosagem do Concreto.....	66
Figura 18 - Curvas granulométricas para os agregados - NM 248/2003.....	68
Figura 19 - Absorção de água ao longo do tempo do ARC.....	69
Figura 20 - Comparação entre os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade, nos 10 minutos iniciais do ensaio. Fonte: Werle et. Al, 2010.....	71
Figura 21 - Porosimetria ARC- Volume acumulado de poros no concreto.....	73
Figura 22 - Porosimetria do ARC – Distribuição do volume de poros no concreto reciclado.....	73
Figura 23 - Sistema experimental do método de absorção capilar (RILEM, 1999).....	75
Figura 24 - Corte das amostras.....	76
Figura 25 – Colagem dos corpos de prova às células de acrílico.....	77
Figura 26 - Esquema da montagem do ensaio de penetração de cloretos.....	77
Figura 27 - Ensaio de absorção de cloretos.....	79
Figura 28 – Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial.....	81
Figura 29 – Efeito isolado da variável “teor de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial.....	82
Figura 30 – Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento de resistência à compressão axial.....	82

Figura 31 – Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral .....	85
Figura 32 – Efeito isolado da variável “teor de substituição” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral .....	85
Figura 33 – Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral .....	85
Figura 34 – Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC a/c 0,85 .....	88
Figura 35 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC a/c 0,85.....	88
Figura 36- Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC a/c 0,85.....	88
Figura 37 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC a/c 0,85.....	88
Figura 38- Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC a/c 0,56.....	88
Figura 39 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC a/c 0,56.....	88
Figura 40 - Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC a/c 0,56.....	88
Figura 41 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC a/c 0,56.....	88
Figura 42 - Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC a/c 0,43.....	89
Figura 43 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC a/c 0,43.....	89
Figura 44 - Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC a/c 0,43.....	89
Figura 45 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC a/c 0,43.....	89
Figura 46- Gráfico de absorção de água por capilaridade dos concretos com o a/c final diferentes tipos de agregado .....	91
Figura 47- Carga total passante após 6 h de ensaio.....	95
Figura 48- Absorção de cloretos por capilaridade com o a/c final dos concretos - diferentes tipos de agregado .....	101

## **RESUMO**

### **AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO FRENTE À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

**ALINE TROIAN**

A geração de resíduos causados pela construção civil e crescente demanda de recursos naturais do setor vem resultando na utilização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como matéria prima. A prática do uso deste resíduo como agregado está sendo de extrema importância para o meio ambiente e para a sociedade de um modo geral. O escopo deste trabalho restringe-se ao estudo de agregado reciclado de concreto (ARC). As principais diferenças entre os agregados naturais e reciclados dizem respeito à porosidade e resistência à compressão, que podem influenciar diretamente tanto nas propriedades do concreto fresco, como nas propriedades do concreto endurecido, afetando a sua durabilidade. A porosidade do agregado de concreto reciclado influencia a sua absorção de água, o que pode alterar a demanda de água da mistura do concreto. Neste caso o processo de pré-molhagem pode ser adotado com o objetivo de compensar esta absorção e garantir a manutenção da consistência. Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARC) frente à penetração de íons cloreto. Foram produzidos ARC em laboratório com concretos de diferentes níveis de  $f_c$ , 18 MPa (a/c de 0,85), 37 MPa (a/c 0,56) e 50 MPa (a/c 0,43). Estes agregados foram empregados em uma nova matriz de concreto com uma relação a/c de 0,64, substituindo o agregado natural pelo ARC em diferentes teores, 0, 25,50, 75 e 100%. Os agregados reciclados foram pré-molhados com cinco diferentes teores, de 0 a 100%. Foram realizados ensaios de resistência mecânica e de durabilidade, como resistência à compressão e à tração, absorção de água, absorção de íons cloreto e penetração acelerada de íons cloreto. O método empregado para verificar a resistência à penetração acelerada de íons cloreto foi o da norma ASTM C1202-07. A absorção de água e de íons cloreto empregou o método adaptado do proposto pelo RILEM TC 166-PCD. Os resultados foram avaliados por análise estatística, indicando que tanto o teor de agregado, como o teor de pré-molhagem apresentam efeitos significativos sobre a penetração de íons cloreto, enquanto que o tipo de agregado apresenta efeito quando em interação com outras variáveis de controle. Para as demais propriedades de durabilidade, as variáveis de controle apresentam a mesma tendência de comportamento.

## **ABSTRACT**

### **DURABILITY ASSESSMENT OF CONCRETE PRODUCED WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATE BY CHLORIDE IONS PENETRATION**

**ALINE TROIAN**

The construction and demolition waste generation and the crescent natural resources demand by construction industry has led the use of Construction and Demolition Waste (CDW) as raw material. This practice is important for the environment conservation. The work scope concerns only to recycled concrete aggregate (ARC). The porosity and compressive strength are the main differences between natural and recycled aggregates. These facts influence fresh concrete and the hardened concrete properties, which can affect its durability and mechanical performance. The higher recycled concrete aggregate porosity causes higher water absorption than the natural aggregate, and the water demand of the concrete mix may will increased for the slump maintenance. The pre-wetting can be adopted in order to compensate this absorption and ensure the slump maintenance. The aim of this research is the durability assessment of concrete produced with recycled concrete aggregate by chloride ions penetration. ARC were produced in the laboratory with different levels of concrete compressive strength, 18 MPa (w/c 0.85), 37 MPa (w/c 0.56) and 50 MPa (w/c 0.43). Recycled aggregate were used as 25%, 50%, 75% and 100% replacements of natural coarse aggregate in the concrete mixtures. The ARC pre-wetting was conducted at five levels, from 0 to 100% by recycled aggregate total water absorption. The ARC compressive strength, ARC amounts and pre-wetting effects on the compressive and tensile strength, water absorption and chloride-ion penetration of concrete produced with recycled aggregate were investigated. It was used the Accelerated Resistance to Chloride Ion Penetration ASTM C 1202-97 Test Method and adapted RILEM TC-166 PCD Water Absorption Test Method. Data analysis was conduced using statistical analysis, including ANOVA and multiple regression. These analyses indicated the significant effect of ARC type and amount and pre-wetting level on the chloride ion penetration and water absorption. For the compressive strength the ARC type and amount have a significant effect, while for the tensile strength only the ARC amount has a significant effect.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é baseado na conservação ambiental, ou seja, é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro (VALLE, 2004).

Segundo Vásquez (2001), a construção sustentável está baseada na prevenção e redução dos resíduos através do desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de materiais recicláveis, reutilizáveis ou subprodutos, até a coleta e disposição final dos resíduos inertes.

A construção civil é sem dúvida o setor responsável pelo maior volume de consumo de recursos naturais, estimando-se que seja responsável pelo consumo médio de 33% dos recursos extraídos. Os seus produtos consomem grande potencial de energia, conforme afirma John (1999) com base em levantamentos realizados em diversas bibliografias.

A indústria da construção civil, que vem sofrendo imensas transformações em suas técnicas construtivas e seguindo o forte apelo tecnológico mundial, acaba sendo extremamente questionada, pelo fato destes avanços incidirem diretamente em problemas referentes aos recursos naturais. Até alguns anos atrás os insumos empregados pelo setor eram considerados inesgotáveis, ou melhor, não havia a preocupação corrente com o esgotamento dos recursos naturais. Porém a sua exploração excessiva e desordenada está resultando em graves problemas ambientais.

Por outro lado o setor em questão é responsável anualmente por 75 milhões de toneladas do total de resíduos industriais produzidos, (ANFAC, 2009). A quantidade de resíduos gerados nas construções brasileiras demonstra um enorme desperdício de material. Os custos dos desperdícios são distribuídos por toda a sociedade, não só pelo aumento do custo final das construções, como também pelos custos de remoção e tratamento deste resíduo.

É crescente o número de cidades brasileiras que apresentam um elevado volume de resíduos gerado pela construção civil (RCC), podendo ainda ser denominados Resíduo de Construção e Demolição (RCD), quando estes são oriundos de novas obras, reformas e demolições. Segundo Buttler (2003), é inevitável a geração de resíduos em um processo de fabricação. Quando não há um conhecimento da tecnologia apropriada para a reciclagem de um resíduo, certamente será depositado na natureza, resultando em inúmeros problemas

ambientais. Em algumas ocasiões nem sempre a falta de tecnologia é o desafio, mas sim a inexistência de uma legislação rigorosa, que venha apontar diretamente os responsáveis por tais atos contra a natureza.

Os resíduos da construção civil e demolições representam 61% do resíduo urbano produzido nas cidades brasileiras, segundo dados da Secretária Nacional de Saneamento do Ministério das Cidades (2005). De acordo com a pesquisa, este percentual corresponde a 90 milhões de toneladas de resíduo urbano ao ano, que deve ser depositado em áreas previamente estabelecidas, obedecendo a regras e normas ambientais criadas pelos estados e municípios de acordo com as leis que tratam do tema.

No contexto atual, pode-se verificar um forte apelo ao desenvolvimento sustentável e a necessidade de uma nova postura da sociedade em relação com o meio-ambiente. Os exemplos de pesquisas na Construção Civil que estão em desenvolvimento e são voltadas a sustentabilidade, são aquelas que enfocam a reduções de desperdícios de materiais, a busca de uma melhoria contínua da mão-de-obra, maior qualidade em seus produtos, projetos voltados para a sustentabilidade ambiental, reciclagem de resíduos e a procura de uma maior durabilidade nos produtos, são as linhas.

A opção de reciclagem é a melhor forma de se amenizar os efeitos problemáticos dentro do meio urbano, podendo gerar ainda novos produtos a serem comercializados, como argamassas, concretos e blocos. É o que apontam as inúmeras pesquisas realizadas, no que diz respeito ao reaproveitamento dos RCD.

Conforme Buttler (2003), entre os vários resíduos da construção civil, pode-se citar os resíduos de concreto como tendo um dos maiores potenciais de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (resistência à compressão, idade, etc.) e seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparado com outros resíduos da construção. Os principais agentes geradores de resíduos de concreto são as fábricas de pré-moldados, usinas de concreto pré-misturado, demolições de construções e pavimentos rodoviários.

No presente contexto, torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos agregados reciclados e dos concretos confeccionados com esses agregados reciclados, a fim de tornar viável a sua utilização. Outro aspecto fundamental, sobre o qual não se tem muitos estudos, é a durabilidade desses concretos. Entre os trabalhos desenvolvidos, a maioria apresenta uma avaliação das propriedades mecânicas e a sua viabilidade técnica na aplicação

desses materiais na incorporação de novos concretos. As pesquisas que estudam a durabilidade dos concretos reciclados ainda são incipientes. A falta de estudos, relacionados ao emprego do material reciclado sem nenhum critério científico podem comprometer a qualidade do produto e colocar em risco a segurança na obra.

Segundo Cabral (2007), existe fatores limitantes para a expansão da utilização dos agregados reciclados tais como a variabilidade dos seus componentes e conseqüentemente das suas características, a possível contaminação dos RCD por agentes agressivos, que podem vir a minorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos concretos confeccionados com os reciclados. É necessário, portanto estudar estes agentes, no caso estudar os íons cloreto, que são considerados os mais problemáticos dentro do processo da corrosão de armaduras (BERTOLINI et al;2007, METHA e MONTEIRO; 2008).

A ação dos íons cloreto nas estruturas de concreto pode ter origem na mistura do concreto, ou seja, no amassamento, sendo este então incorporado na pasta do concreto, pode também estar inseridos no meio externo, assim penetram no concreto endurecido. Torna-se realmente fundamental o entendimento de sua forma de atuação e a capacidade dos materiais de impedirem a sua penetração acarretando em um menor índice de corrosão, e assim aumentando a vida útil das estruturas.

Conforme Siqueira (2008) é necessário conhecer as possíveis formas de contaminação dos concretos por íons cloretos e o mecanismo de transporte destes íons através da rede de poros. Existem quatro mecanismos de transporte de íons no concreto: Absorção Capilar, Permeabilidade, Difusão e Migração Iônica, que podem atuar simultaneamente ou sucessivamente ao longo do tempo conforme as condições de exposição a que o concreto encontra-se submetido (CALÇADA, 2004).

Muitos trabalhos já forma desenvolvidos com RCD, destacando-se a dissertação de mestrado de Lovato (2007) com RCD misto, que estava inserido em um projeto desenvolvido em rede com participação da Ufrgs, Unisinos, Feevale e Cientec. Os resultados alcançados na pesquisa e apresentados pela autora indicaram a necessidade do estudo das características individuais de cada material que compõem o RCD. Na Unisinos é desenvolvido o projeto *Utilização de RCD na Construção Civil* com subprojetos atrelados ao mesmo. Assim, no sub projeto *Resíduos de Concreto* o estudo dos RCD se baseia no agregado oriundo do resíduo do concreto endurecido. O presente trabalho está inserido dentro deste contexto abrangente, que, em uma primeira etapa, envolve outras duas dissertações de mestrado desenvolvidas em

paralelo, englobando propriedades do concreto no estado fresco, propriedades mecânicas e durabilidade, com financiamento da FINEP. A Figura 1 apresenta um organograma do referido projeto.



Figura 1 – Organograma do Projeto Utilização de RCD na construção civil.

Neste trabalho, foram enfocados os aspectos de durabilidade relativos aos íons cloreto, bem como a análise das propriedades mecânicas, cujos dados são oriundos de Grub (2010) nos concretos confeccionados com diferentes agregados graúdo de concreto reciclado.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral, verificar a influência dos agregados reciclados de concreto (ARC) na durabilidade de concretos, frente à penetração de íons cloreto.

E tem como objetivos específicos:

- Verificar a influência da porosidade do ARC na penetração acelerada de íons cloreto, na penetração de íons cloreto por absorção, na absorção de água, bem como na resistência à compressão e à tração de concretos produzidos com este agregado;
- Verificar a influência dos teores de substituição dos agregados naturais por ARC na penetração acelerada de íons cloreto, na penetração de íons cloretos por absorção, na absorção de água, bem como na resistência à compressão e à tração de concretos produzidos com este agregado;

- Verificar a influência do teor de pré-molhagem dos ARC na penetração na penetração acelerada de íons cloreto, na penetração de íons cloretos por absorção, na absorção de água, bem como na resistência à compressão e à tração de concretos produzidos com este agregado.

## **1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Esta pesquisa foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo está inserido a introdução, a apresentação do problema, a justificativa e os objetivos do trabalho a serem atingidos.

No capítulo dois, está contemplada a revisão bibliográfica, que relaciona o tema RCD (Resíduo de Construção e Demolição), durabilidade, penetração de íons cloreto e ARC. Também é apresentado o concreto produzido com agregado reciclado de concreto e o estudo de suas propriedades frente à ação dos íons cloreto, bem como todo o contexto da penetração dos íons cloreto no concreto reciclado.

O programa experimental está inserido no capítulo três, onde são definidas as variáveis envolvidas no estudo e apresentado o planejamento de experimentos. Também neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados.

O quarto capítulo apresenta os resultados, as análises e discussões dos resultados, obtidos durante a etapa do programa experimental.

O quinto capítulo traz as conclusões da pesquisa, apontando a influência das variáveis estudadas. Ainda contido neste capítulo estão as sugestões para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão abordados temas pertinentes ao trabalho, como resíduos de construção e demolição, resíduos de concreto, durabilidade e concreto com agregados reciclados.

### 2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

#### 2.1.1 Definição e composição dos RCD

A atual definição de RCD é motivo de muitas discordâncias, não apenas quando se trata das frações abrangentes que estão presentes, mas também a relação às atividades resultantes destas frações (ÂNGULO, 2000).

A Resolução 307, de 5 julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece:

[...] Resíduos da construção civil: são os provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fração elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA, 2002).

Os RCD podem ser compostos por diferentes materiais, como os solos, rochas naturais, concretos, argamassas (de assentamento e revestimento), cerâmicas para revestimentos, cimento-amianto, gesso, vidro, aço, chapa de aço galvanizado, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papel de embalagem e restos de vegetais. A composição desses resíduos depende da fonte que os originou, no exato momento que a amostra foi coletada e do tipo de construção. A Tabela 1 mostra um comparativo entre os resíduos de construção e demolição verificada em alguns trabalhos anteriores, já pré-selecionados.

**Tabela 1 - Comparativo da composição dos RCD.**

Componente	%			
	Pinto (1986)	Zordan (1997)	Leite (2001)	Vieira (2003)
Argamassa	63,67	37,40	28,26	27,82
Concretos	4,73	21,10	15,18	18,65
Cerâmicas	29,09	20,80	26,33	48,15
Outros	2,20	20,70	30,23	5,38

Fonte: Lovato, 2007.

Conforme Zordan (2000), o resíduo de construção e demolição provavelmente seja o mais heterogêneo dos resíduos industriais. Uma edificação é composta por diversos componentes, resultando nessa heterogeneidade dos resíduos no processo de demolição. Sendo que nem ao menos um resíduo de concreto ou argamassa é igual, quando comparados com materiais de duas obras. Oliveira e Assis (1999) afirmam que o resíduo de concreto pode ser originado de diversas fontes, como os concretos que foram dosados, fabricados e aplicados com um controle tecnológico; e concretos produzidos sem este controle de qualidade. O nível de resistência vai interferir diretamente na porosidade final do resíduo.

Segundo a Resolução 307 do CONAMA, os RCD são classificados em quatro classes, de acordo com as possibilidades de reciclagem, sendo elas: A, reutilizáveis ou recicláveis como agregados; B, recicláveis para outras destinações, tais como plásticos; C, sem tecnologia de reciclagem economicamente viável; D, grau de periculosidade dos resíduos. A *classe A* é composta por materiais minerais como concretos, argamassas, tijolos e telhas cerâmicas, rochas naturais, solos entre outros (CONAMA, 2002), e esta, segundo Ângulo et al. (2004), representa a maior fração dos resíduos gerados.

Os resíduos, sejam eles quais forem, devem ser classificados, do ponto de vista de risco ambiental, sendo assim direcionados ao seu correto destino e manuseio. Até então, classifica-se o RCD como Classe II B-Inertes. Segundo a ABNT NBR 10004:2004, resíduo Classe II B é definida como

[...] quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:2004, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.”

Porém, inúmeros estudos reconhecem que há a necessidade de se proceder investigação quanto à classificação ambiental dos RCD. Assim, é importante que sejam realizados testes de lixiviação e solubilização nos resíduos de construção e demolição com a finalidade de garantir que estes não sejam prejudiciais ao meio ambiente. De acordo com LIMA (1999), a classificação pode ser feita, também com base no teor de impurezas existentes nas partidas de resíduos que chegam às usinas, como acontece nas recicladoras implantadas no país, ou ainda, com base no tipo de componente predominante no resíduo.

No Brasil, é estimado que em média 65% do material descartado são de origem mineral, 13% madeira, 8% plásticos e 14% outros materiais. As construtoras são responsáveis

pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução (TECHNE, 2009).

De acordo com Leite (2001), a composição do resíduo de construção e demolição tem influência direta na análise do comportamento do agregado no concreto. A autora analisou a composição do resíduo proveniente da cidade de Porto Alegre, representada na Figura 2.



**Figura 2 - Composição de RCD em Porto Alegre / RS**  
Fonte: LEITE, 2001

Na região do Vale do Rio dos Sinos a produção de RCD apresenta a seguinte composição, conforme Figura 3 e Figura 4.



**Figura 3 - Composição de RCD em São Leopoldo/RS**  
Fonte: KAZMIERCZAK *et al.*, 2006



**Figura 4 - Composição de RCD em Novo Hamburgo/RS**

Fonte: KAZMIERCZAK *et al.*, 2006

Os estudos relacionados aos resíduos de concreto atestam o grande potencial do material como agregado reciclado. No Brasil, os estudos concentram-se, basicamente, no tratamento das sobras de concreto em centrais dosadoras e no reaproveitamento de resíduos de construção e demolição mistos (BUTTLER, 2003).

Para uma possível transformação dos resíduos em co-produtos é necessário que se faça uma separação dos mesmos, para adequada aplicação posterior. Esta separação seria mais eficiente se fosse realizada previamente no canteiro de obras, controlando todos os compostos gerados, determinando a qualidade dos mesmos.

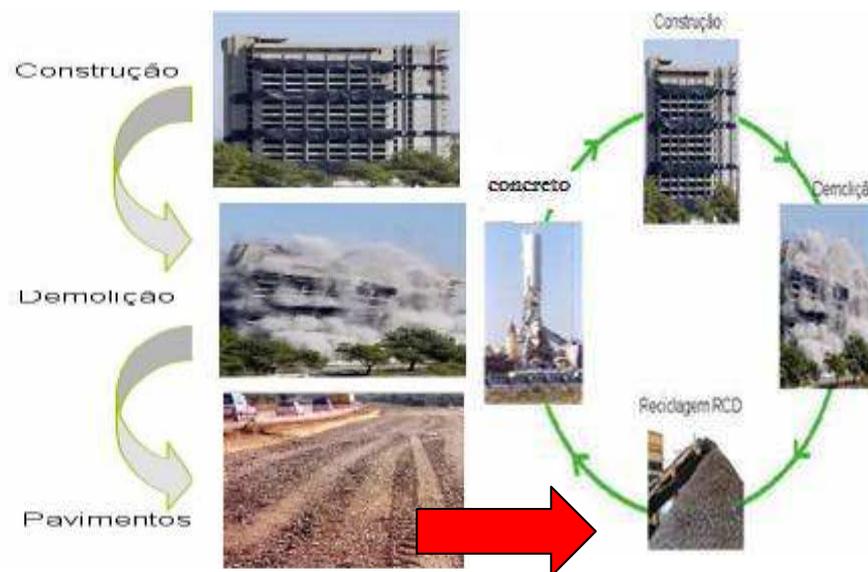
### 2.1.2 Reciclagem dos RCD

A reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens. A contribuição ambiental mais evidente da reciclagem é a preservação de recursos naturais, que ao serem substituídos por resíduos, prolonga-se a vida útil das reservas naturais e se reduz a destruição da paisagem, flora e fauna. Sendo esta contribuição significativa, até mesmo onde os recursos são abundantes, como é o caso do calcário e da argila, pois a extração de matérias-primas modifica a paisagem e o ecossistema (JOHN, 1999).

Os resíduos de construção causam impactos negativos significativos nas cidades, e a prática de sua reciclagem avança rapidamente como uma das alternativas para lidar com os problemas que causam. Para que os resíduos de construção e demolição deixem de ser um problema e passem a ser uma solução, a reciclagem desses materiais constitui-se na técnica mais simples e rentável em termos econômicos e sociais.

O setor da construção civil é um dos setores produtivos que mais aproveita os resíduos, transformando-os assim em subprodutos. Há dados do aproveitamento de resíduos de vidro e de borracha, com excelente desempenho, como agregados miúdos e graúdos na confecção de concretos (DHIR et al., 2004); aproveitamento de resíduos das indústrias de ferro-silício (sílica ativa), da cinza da casca de arroz e da queima do caulim (metacaulim), como adições; e de escórias de aciaria, de alto-forno e de cobre (MEHTA e MONTEIRO, 2008), como adições e também como agregados na confecção de concretos, dentre tantos outros tipos de resíduos utilizados e ainda pesquisados.

Com relação à reutilização ou ao reaproveitamento dos resíduos gerados pelos processos transformadores, ou seja, encaixá-los novamente na cadeia produtiva como subprodutos, que teriam aplicabilidade em outro processo, atualmente a Indústria da Construção Civil é a maior responsável pela reciclagem no Brasil e na maioria dos países (JOHN, 2001). Conforme a Figura 5.



**Figura 5 - Processo da Cadeia Produtiva dos RCD.**

Fonte: Laboratório Nacional de Engenharia civil Lisboa 26 de junho de 2008

A reciclagem do resíduo, apesar de existirem técnicas mais sofisticadas tecnologicamente, pode ser realizada com instalações e equipamentos de baixo custo, podendo até mesmo ser realizada na própria obra que gera o resíduo, reduzindo uma significativa parcela de atividades agregadas, como por exemplo, os custos com transporte (GRIGOLI, 2001).

De tal maneira reciclar os RCD, independente do uso que a ele for dado - representa vantagens econômicas, sociais e ambientais, tais como:

- Economia na aquisição de matéria-prima, devido à substituição de materiais convencionais, pelo resíduo;
- Diminuição da poluição gerada pelo resíduo;
- Minimizar as conseqüências negativas como enchentes e assoreamento de rios e córregos, decorrente da disposição irregular;
- Preservação das reservas naturais de matéria-prima;
- Diminuição do resíduo depositado em aterros;
- Abertura de novos negócios e geração de empregos diretos e indiretos.

No Brasil, o pioneiro nos estudos sobre a reciclagem de resíduos de construção foi o arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, em 1986. Seu primeiro trabalho foi uma dissertação de mestrado realizada com a utilização de resíduos de construção na fabricação de argamassas. Depois deste fato, desencadeou-se no país uma consciência coletiva por parte da sociedade e do meio técnico, até então um assunto sem percepções, no que diz respeito à reciclagem de resíduos de construção e demolição.

### **2.1.3 Aplicabilidade**

Em alguns países onde a reciclagem de resíduos de construção já está concretizada de fato, a utilização de agregados reciclados há muito deixou de ser apenas em obras de construção de rodovias. Nos países europeus, precursores da reciclagem de resíduos de construção e demolição, o concreto reciclado já está sendo utilizados no concreto armado, para casas residenciais de médio padrão, portos marítimos e até em concretos de alta resistência (VIEIRA, 2003).

Segundo Levy (2001), a Comunidade Européia realizou, a partir de 1988, uma série de obras de concreto obtido a partir da reciclagem de resíduos de concreto e alvenaria, bem como da mistura de ambos, as quais eram e continuam sendo monitoradas para que se possa avaliar o comportamento desses concretos com relação à capacidade portante e durabilidade.

A seguir são citadas algumas obras realizadas, nos seus respectivos países, com suas principais características:

A *Holanda* é o país com melhor índice de reaproveitamento de resíduos de construção, aproximadamente 80% dos resíduos gerados. Essa medida se deve, em parte, a grande escassez de recursos naturais no país. Por conta da falta de recursos, a Holanda importa areia natural da Sibéria e resíduo da Inglaterra (TECHNE, 2001). Tendo em vista este fato, a solução é fazer o uso de materiais alternativos e de baixo custo. Um resumo das obras utilizado- se agregados reciclados, pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2 - Exemplo de obras de concreto com agregado reciclado na Holanda**

Ano	Obra realizada	Aplicação
1988	Viaduto na rodovia RW -32	Muretas Laterais
1988	Eclusa na hidrovía de Haandrick	Laje submersa
1989	Interligação entre a barragem e a eclusa	Laje submersa
1990	2 ° viaduto na rodovia RW-32	Todos os componentes das estruturas
1997-1998	Empreendimento residencial de médio padrão	Painéis pré-moldados de concreto

Fonte: Levy, 2001

Na obra do empreendimento residencial, o projeto foi desenvolvido para evidenciar a viabilidade técnica de substituição de 100% de agregados naturais pelo reciclado. Os painéis não apresentaram diferenças no aspecto visual com relação aos concretos com agregados naturais e o isolamento acústico atende as normatizações. Este mesmo empreendimento está servindo de suporte para regulamentação de normas específicas para a construção e produção de concretos com agregados reciclados (LEVY, 2001).

Já a *Inglaterra*, além de exportar para a Holanda os resíduos, também é referência em obras executadas com agregados reciclados (Tabela 3).

**Tabela 3 - Exemplo de obras de concreto com agregado reciclado na Inglaterra**

Ano	Obra realizada	Aplicação
1996	Edifício do meio ambiente do BRE	Fundações, Lajes e Pilares
1996	Piso do laboratório de Cardinton BRE	Piso de alta resistência
1999-2000	Novo centro para operações de tratamento de água	Aplicado em toda a estrutura

Fonte: Levy, 2001

Na obra do edifício do meio ambiente, as fundações alcançaram resistências de 25 MPa, as lajes obtiveram 20 MPa e o cimento utilizado foi com adição de escória de alto forno.

Desde o final da segunda guerra mundial a *Alemanha* se destaca por ser pioneira na reutilização de resíduos de construção e demolição. A seguir apresentam-se algumas obras na Tabela 4.

**Tabela 4 - Algumas obras realizadas na Alemanha com AGR**

<b>Ano</b>	<b>Obra realizada</b>	<b>Aplicação</b>
1945-2000	Reconstrução das cidades alemãs	Concretos normais, leves e blocos de concretos
1996-1997	Unidades residenciais e comerciais	Em toda a estrutura
1999	Concretos, alvenaria de blocos cerâmicos e combinação de ambos	Peças decorativas

Fonte: Levy, 2001.

Na obra de unidades residenciais, foram construídas 550 unidades, cujo objetivo era propagar a utilização da reciclagem de materiais de construção civil. Para as peças decorativas foi utilizado cimento branco e cinza, de acordo com o tom do acabamento externo (VIEIRA, 2003).

No Brasil a utilização de agregados reciclados ainda é lenta. No país o agregado reciclado, é na maior porcentagem utilizado em pavimentação, pelo fato de ainda existir muitas dúvidas e questionamentos a respeito do uso do agregado reciclado em concreto estrutural. O aspecto principal, é que o RCD possui uma imensa variabilidade e é indispensável um estudo aprofundado de suas propriedades. O país ainda está mais preocupado em resolver os problemas com a falta de um gerenciamento de seus resíduos que afetam os grandes centros metropolitanos. Por enquanto a questão da escassez de recursos naturais parece ficar em segundo plano, mas é essencial que se tenham estudos e soluções, para que se possa utilizar os RCD em novas construções, pois a problemática da extração mineral já é um fato visível e a construção civil no Brasil precisa seguir estes novos paradigmas.

## **2.2 DURABILIDADE**

O Concreto armado é o material de construção mais utilizado pelo homem, ultrapassando o aço, o tijolo cerâmico e a madeira. O concreto armado atendeu todas as necessidades da construção pós- guerra. Na época, foram desenvolvidos novos sistemas construtivos e novos modelos de cálculos, a fim de buscar uma intensa produtividade e menores custos, fatores decisivos para a reconstrução. No entanto, a evolução dos métodos empregados, em parte, trouxe consequências negativas às construções, aumentando a esbeltez das estruturas, reduzindo as dimensões das peças estruturais e o cobrimento das armaduras e incrementando as tensões de trabalho (IBRACON, 2005). Deste modo, tais mudanças tiveram um reflexo direto sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado, favorecendo a tendência à fissuração e reduzindo a proteção das armaduras.

As estruturas de concreto armado devem ser construídas para desempenhar as funções que lhe foram atribuídas, durante um período de vida previsto. Deste modo, conforme Neville (1997), o concreto é considerado durável. A estrutura será considerada durável quando desempenhar as especificações de projeto, mantendo resistência e utilidade com segurança durante um período de tempo predeterminado, pelo menos razoável. Conforme o comitê 201 do ACI, citado por Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade do concreto é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, conservando sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente.

No Brasil, a preocupação com a durabilidade iniciou-se com mais força a partir dos anos 90, com o aumento do número de estruturas deterioradas e com a formação de um primeiro núcleo de pesquisadores relacionados com a durabilidade das estruturas de concreto. No país hoje ainda existe uma falta do levantamento das manifestações patológicas existentes nas obras (pontes e viadutos), há poucos dados estimados. A grande maioria destas obras foi construída em um importante panorama da economia brasileira, ocorrido entre as décadas de 70 e 80, possuindo, portanto, uma idade média aproximada de 30 a 40 anos. Neste período, os projetos de cálculos adotaram resistências de projeto entre 15 e 25 MPa, com um cobrimento de armadura inferior ao necessário para uma boa proteção, isso em parte acontecia por uma deficiência normativa (IBRACON, 2005).

A perda da durabilidade do concreto armado é freqüentemente causada por uma conjunção de fatores que incluem a falta de conhecimento do meio que ficarão expostas as estruturas, bem como especificações inadequadas e construções executadas sem os parâmetros exigidos pelas normas técnicas.

O texto da ABNT NBR 6118:2003, apesar de não deixar explícita uma metodologia para a previsão da vida útil e um valor numérico para a mesma, deixa bastante claro a importância da questão durabilidade na elaboração de um projeto, no que se refere à execução e à manutenção de estruturas de concreto. A nova citação contempla mudanças significativas que vão da nomenclatura do concreto, ao cobrimento mínimo das armaduras e também define critérios de projeto visando à construção de obras duráveis. Outra novidade é a classificação das estruturas de concreto em relação ao seu risco de deterioração, em função da agressividade do meio ambiente onde a obra está inserida.

Uma boa durabilidade do concreto e das estruturas depende da sua fabricação, com materiais não expansivos e de sua capacidade para resistir às inúmeras agressões provenientes do meio externo. Sendo isto de total relevância, dependendo das condições ambientais e climáticas, o concreto está submetido aos efeitos de um conjunto de agentes agressivos e de diferentes fatores destrutivos, que em diversas situações podem atuar conjuntamente. O resultado destas interações ambientais com a microestrutura do concreto é a mudança de suas propriedades (SILVA e DJANIKIAN, 1993). No caso das estruturas não serem bem projetadas e executadas, as mesmas não resistem a este desgaste ambiental pelo tempo requerido em projeto.

As ações do meio ambiente são devidas aos agentes climáticos (umidade, temperatura, radiação solar, alternâncias de temperatura no interior do material que provoca o congelamento e degelo da água, entre outros fatores), a agentes químicos (presença de íons agressivos no concreto e no seu meio fluído) e agentes biológicos (como os microorganismos).

De acordo com a norma da ABNT NBR 6118:2003 (item 6.4),

[...] a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

A norma define, que a avaliação da agressividade do meio ambiente sobre uma dada estrutura pode ser feita de modo simplificado, de acordo com as condições que as peças estruturais são expostas.

A durabilidade do concreto depende principalmente da porosidade capilar, sendo função do tipo de aglomerante e relação água/cimento. Segundo Metha e Monteiro (2008), os poros de ar incorporado possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser decorrentes de uma má vibração do concreto ou terem sido intencionalmente incorporados. Devido a suas grandes dimensões, reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam a permeabilidade, agindo diretamente na durabilidade do material.

A boa qualidade do concreto depende, além do tipo de aglomerante e da relação água/cimento, da cura e do grau de hidratação, sendo esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade, de migração de íons e de difusividade de água e de gases, assim como as propriedades mecânicas, resistência à

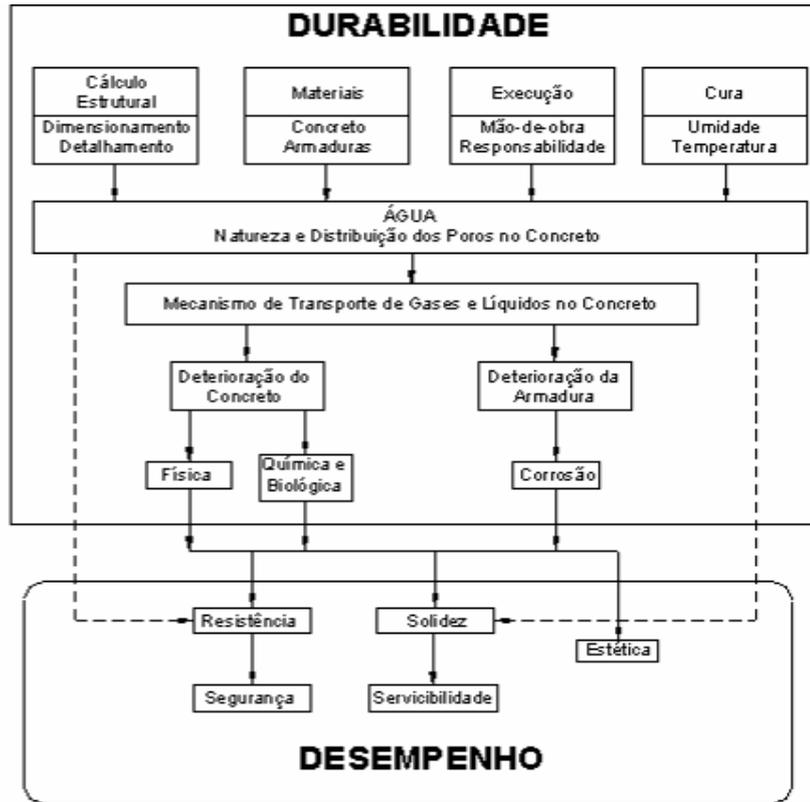
compressão, à tração, módulo de elasticidade, abrasão, entre outros (HELENE, 1997). O mesmo autor coloca que a qualidade do concreto na obra deve ser controlada visando garantir os procedimentos corretos de mistura, transporte, lançamento, adensamento, desmoldagem, cura e critérios específicos e adequados a cada projeto.

Helene (1999) enfoca que todas as medidas, decorrentes do ponto de vista econômico, visando à durabilidade, tomadas em nível de projeto são sempre mais viáveis, seguras e de menor custo que medidas de intervenção posteriores. Os custos crescem exponencialmente quanto mais tarde ocorrer esta intervenção.

Conforme a Lei de Sitter (1984), colaborador do CEB – Comitê Euro-International du Béton, os custos relativos às intervenções de manutenção preventiva são substancialmente menores que em casos de manutenção corretiva, os quais crescem em relação aos custos diretos em progressão geométrica, chegando a ser cinco vezes maior.

O texto da ABNT NBR 6118:2003 estabelece que, por vida útil de projeto, “*entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor*”. A dificuldade de se introduzir o fator “tempo” na abordagem sobre a durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto é a consequência da complexidade dos mecanismos de deterioração envolvidos.

Os conceitos de durabilidade, vida útil e desempenho estão interligados. A figura 6 resume os parâmetros de avaliação de durabilidade e desempenho de uma estrutura.



**Figura 6 - Parâmetros de avaliação de durabilidade e desempenho de uma estrutura**

Fonte: Souza e Ripper, 1998.

O “desempenho de um material” é entendido como seu comportamento relacionado ao uso, que pode ser: desempenho mecânico; acústico; estético; químico; entre outros (IBRACON, 2005).

O desempenho do concreto está ligado à alcalinidade mínima necessária para garantir a proteção da armadura, estando relacionado com o próprio desempenho da estrutura. Entretanto, esse mesmo concreto estará sujeito a ação de agentes agressivos existentes no ambiente, que reduzirá, com o tempo, a sua alcalinidade, isto é, o seu desempenho químico. Assim este processo acabará resultando na despassivação da armadura, abrindo caminho para a corrosão de armaduras, sendo que, quando chegar à fase de propagação, resultará na perda do desempenho mecânico da estrutura.

### 2.3 CORROSÃO DE ARMADURAS

O concreto armado é constituído de um conjunto de diferentes materiais que tem uma função específica: absorver esforços de tração e compressão. O concreto é formado por cimento, água e agregados e é caracterizado estruturalmente por possuir alta resistência à compressão. No entanto, sua resistência à tração é baixa e devido a isso, o aço é incorporado ao concreto para resistir aos esforços de tração, formando então o *concreto armado*.

As armaduras de aço, dentro da massa do concreto, são protegidas contra a corrosão pelo fenômeno conhecido como passivação do aço, decorrente da grande alcalinidade do meio (concreto), pois o pH da água existente nos poros atinge valores superiores até 12,5.

Muitos autores concordam que a corrosão de armaduras, ocorre em função da destruição da película passivadora. A película passivadora, pode ser descrita, por ser uma camada invisível de óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Conforme Helene (1993), esta passividade causada pelo filme de óxidos é uma barreira que dificulta a ocorrência da corrosão.

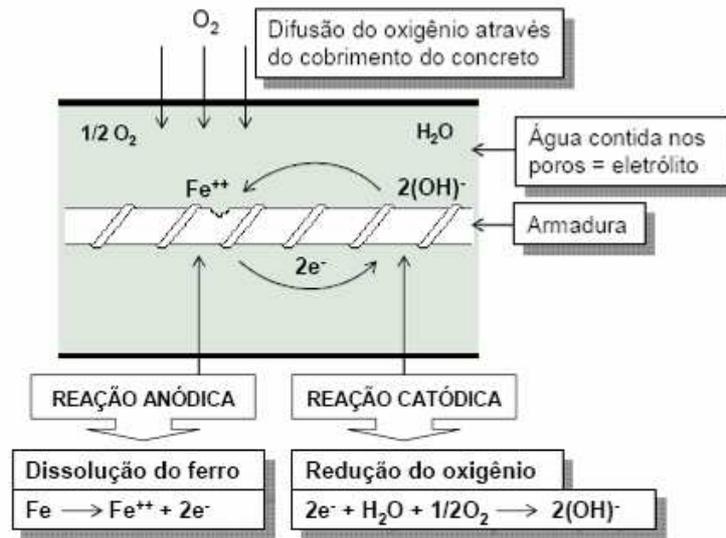
A corrosão das armaduras dentro do concreto, apenas ocorre se a película passivadora for destruída. Isto pode acontecer devido a três diferentes causas:

- Lixiviação do concreto na presença de fluxos de água que percolam através de sua massa;
- Redução do pH, abaixo de 9, por efeito da carbonatação da camada de cobrimento da armadura;
- Presença de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) ou de poluição atmosférica acima de um valor crítico.

A corrosão de armaduras no interior do concreto procede basicamente por mecanismos eletroquímicos, onde ocorre uma reação elétrica que envolve a condução de cargas, ou seja, elétrons entre regiões diferentes de um mesmo metal. Pode ser feita uma subdivisão no metal, pois em uma região ocorrem as reações que equivalem à perda de elétrons (região anódica), enquanto em outra se processam as reações de consumo de elétrons (região catódica). A movimentação de íons ocorre pelo eletrólito, que, se tratando do concreto, é a solução contida nos seus poros. Na região anódica acontecem as reações de oxidação do metal, que consiste na dissolução do átomo metálico ou na liberação de íons metálicos para o eletrólito e formação de um fluxo de elétrons através do eletrodo (metal) para a região catódica. Em geral, os íons de ferro ( $\text{Fe}^{++}$ ), com carga elétrica positiva no ânodo, passam para a solução, enquanto os elétrons livres ( $e^-$ ), com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam-se com a água e o oxigênio para formar os íons de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) (GENTIL, 1996).

A armadura funciona como um eletrodo misto, na qual ocorrem reações anódicas e catódicas, e a solução contida nos poros do concreto é o eletrólito (CEB 152, 1984). A Figura 7 mostra um esquema simplificado da célula de corrosão desenvolvida. Qualquer diferença de

potencial gerada entre as zonas catódicas e anódicas ocasiona o surgimento de corrente elétrica e conforme a amplitude desta corrente e o acesso de oxigênio haverá ou não corrosão de armadura.



**Figura 7 - Esquema Simplificado da célula de corrosão**

Fonte: CEB 152, 1984.

A corrosão não existe em *concretos secos* (ausência de eletrólito) e tampouco em *concreto totalmente saturado*, por não haver acesso suficiente de oxigênio. Como a corrosão se apresenta como um fenômeno eletroquímico procura-se evitar que haja no concreto condições que facilitem a formação de pilhas eletroquímicas. Dentre estas condições estão a presença de eletrólitos, aeração diferencial (porosidade do concreto), áreas diferentemente deformadas ou tensionadas (concentração de esforços) e a existência de uma corrente elétrica (GENTIL, 1996).

O concreto por apresentar uma estrutura porosa, não funciona como uma barreira perfeita contra a penetração dos agentes desencadeadores e propagadores da corrosão, chegando-se à conclusão de que, dentro de algum tempo, a armadura será atacada e o processo de corrosão iniciará (ANDRADE, 1993).

A corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, entre eles pode-se citar os íons sulfetos ( $S^{2-}$ ), os cloretos ( $Cl^-$ ), os nitritos ( $NO_3^-$ ), o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o cátion amônio ( $NH_4^+$ ), os óxidos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), gás carbônico ( $CO_2$ ), dentre outros. Esses agentes não permitem a formação ou quebram a película existente de passivação do aço, acelerando a corrosão (HELENE, 1993).

No processo de corrosão de armaduras os agentes agressivos mais problemáticos são os íons cloreto, tanto no que diz respeito ao período de iniciação quanto ao de propagação. Por este fato, é de extrema importância focar melhor essa questão aqui no trabalho.

A corrosão de armaduras em concretos é dividida em duas fases: iniciação e propagação. No processo de iniciação pode ser apontada uma condição especial, onde ao término da qual o equilíbrio químico do aço imerso no concreto é quebrado e a armadura é despassivada. No período da propagação, para que a corrosão continue, depois da despassivação do aço, devem estar envolvidos os elementos essenciais ao processo: o eletrólito, diferença de potencial, oxigênio e possíveis agentes agressivos (HELENE, 1993).

Pode-se dizer que são duas as formas que podem destruir a película passivante de óxidos do aço e resultar na corrosão do mesmo:

- Diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto por **carbonatação** ou reação dos ácidos provenientes do meio;
- Presença de um teor de **íons cloreto** ou de outros íons despassivantes em contato com a armadura do concreto.

Os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) são apontados como o agente agressivo mais problemático dentro do processo da corrosão de armaduras.

Deste modo é importante o estudo destes agentes agressivos, pois a origem dos íons cloreto dentro do concreto provém de diversas formas, sendo necessário primeiramente, identificar como ocorreu à penetração dentro das estruturas de concreto.

### **2.3.1 Origem e importância dos íons cloreto no concreto**

Os cloretos são integrantes dos aditivos aceleradores de endurecimento mais comuns, baseados em  $\text{CaCl}_2$ . Podem estar presentes na água de amassamento e, eventualmente, nos agregados. Nestas formas sua origem é ocasionada durante a mistura dos materiais e é denominado de incorporado.

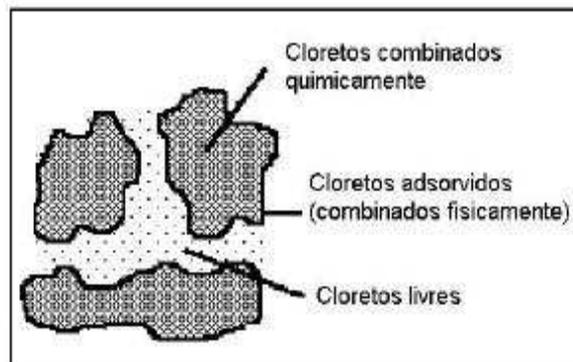
Os íons cloreto também podem ter origem no meio externo, ou seja, estão presentes no interior do concreto, mas não foram incorporados durante o amassamento, são classificados como cloretos que penetram. O ingresso ocorre através da rede de poros, quando o concreto está exposto a fontes externas de contaminação como o ar atmosférico industrial, ambientes marinhos (maresia ou névoa salina) e de sais de degelo usados em estradas e estacionamentos nos países de climas frios. São provenientes também do contato do ácido muriático ( $\text{HCl}$ ),

referentes a lavagem de fachadas. A quantidade de  $Cl^-$  é incrementada temporalmente chegando, até mesmo, a atacar toda a superfície da armadura, podendo provocar velocidades de corrosão intensas e perigosas (POLDER e PEELLEN, 2002).

Segundo o AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - Committee 222 (1991), as primeiras ocorrências de corrosão em armaduras em concreto armado foram diagnosticadas em ambientes marinhos e em indústrias químicas, problemas este que vem se agravando ano após ano, causando graves danos as estruturas, sendo a ação de cloretos a principal responsável. Em regiões próximas ao mar ou em atmosferas industriais, só cloretos penetram no concreto durante a fase de uso.

### 2.3.2 Fases dos íons cloreto no concreto

Os íons cloreto podem ser encontrados no concreto, segundo Tuutti (1982) de três formas: cloretos livres (na forma de íons na água dos poros), cloretos fixos (combinados quimicamente com as fases alumino-férricas, formando cloro-aluminatos), ou fisicamente adsorvidos nas paredes dos poros (através do C-S-H), conforme representado na Figura 8.



**Figura 8 - Fases dos cloretos nos concretos.**

Fonte: Tuutti, 1982.

Os íons que progressivamente contribuem para a corrosão, e também para o transporte de cloretos no concreto, são os íons livres. A primeira causa da despassivação do aço é a presença de cloretos livres presentes no eletrólito dentro dos poros do concreto, resultando assim na corrosão da armadura (HELENE, 1993). O autor afirma que os cloretos potencialmente agressivos são aqueles que se encontram dissolvidos em água, uma vez que como cristal sólido não penetra na porosidade do concreto. No entanto, os cristais de cloretos como sólidos podem se depositar na superfície do concreto até que uma chuva os dissolva, tornando-os livres, podendo ocorrer o transporte para o interior do concreto.

Os resultados estudados por Thangavel et al. (2000) demonstraram que o uso do óxido de alumínio, como aditivo no concreto, ocasionou uma redução no nível de cloretos livres, isso acontece porque o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  combina com o cloreto de cálcio formando os cloroaluminatos.

De acordo com Silva (2006), os íons cloreto que podem ser encontrados quimicamente combinados, denominados sal de Friedel, são cloroaluminatos, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros, quimicamente adsorvidos ao C-S-H e livres na solução contida nos poros do concreto, sendo estes últimos os íons que poderão despassivar e atingir a armadura.

Apesar de serem os cloretos livres solúveis em água os únicos que poderão provocar a corrosão, é conveniente determinar o teor de cloretos totais, uma vez que parte dos cloretos combinados pode ficar disponível devido a carbonatação ou elevação da temperatura.

Pode-se dizer que o tipo de cimento deve ser levado em consideração no teor de íons cloreto livres, pois a composição química do cimento tem grande influência em relação à fixação de cloretos, uma vez que os compostos  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$  combinam-se com íons cloreto para formar os cloroaluminatos, diminuindo o seu fluxo de penetração. A combinação química do  $\text{C}_3\text{A}$  com cloretos são destacados pelos efeitos benéficos, quanto mais altos o teor de  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento e maior o consumo de cimento, maior a quantidade de íons cloreto fixos (LIMA, 1990; NEVILLE, 1997).

### **2.3.3 Taxas admissíveis de íons cloreto no concreto**

Ainda não está definido um consenso sobre o teor limite de cloreto considerado nocivo à estrutura, ou seja, não há como garantir que um baixo valor determinado não ocorrerá a despassivação da armadura, considerando os vários fatores que influenciam no processo de corrosão.

Existe um limite crítico de teor de cloreto capaz de despassivar a armadura. Este limite é dado pela relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  da solução dos poros. A determinação do valor crítico da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  depende de fatores como a composição do concreto, o teor de  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento, a temperatura, a umidade relativa, o pH da solução dos poros, a proporção de cloretos solúveis, o conteúdo de água e a fonte de cloretos, dentre outros (ALONSO et al., 1997).

Segundo o CEB (1992), se o concreto não estiver carbonatado, um teor de cloretos igual a 0,4% em relação à massa de cimento pode ser considerado como um limite adequado para a concentração crítica de cloretos. Helene (1993) concorda com este valor, mas acrescenta que quantidades inferiores a esse limite podem não ser inofensivas, assim como

quantidades superiores não tenham que necessariamente provocar a corrosão. O mesmo sugere que não se tomem os teores de cloretos como um limite matemático, mas como um indicativo do grau de contaminação da estrutura pelos cloretos.

Os teores de cloretos por massa de cimento, apresentados pelo BRE, associados ao risco que estes representam à estrutura, foi citado por Figueiredo (2005) como sendo de baixo risco teores de cloreto inferiores a 0,4%, intermediários entre 0,4% e 1%, e de alto risco quantidades superiores a 1%. No seu trabalho o autor apresenta alguns valores limites, instituídos por normas internacionais, que são tomados como referência na Tabela 5.

**Tabela 5 - Limite de norma para o teor total de cloretos**

Norma	País	Ano	Teor limite de cloretos
ABNT NBR 6118:2003*	BRASIL	2003	Não se reporta ao teor de cloretos*
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambientes com cloretos.
			$\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal.
			$\leq 0,1\%$ em relação à massa do cimento, em ambiente seco.
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa do cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,04% em relação à massa do cimento.
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JSCE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,60\%$ kg/m <sup>3</sup> de concreto

\*A ABNT NBR 6118:2003 não se reporta ao teor de cloretos, mas enfatiza que não é permitido utilizar aditivos contendo cloretos em sua composição, tanto em estruturas de concreto armado, quanto em protendidas. Fonte: Figueiredo, 2005.

A grande parte dos pesquisadores tem como referência usual a massa de concreto ou a água de amassamento para abordar o teor de cloretos, mas é normal, no meio científico, apontar o teor de cloretos em relação à massa de cimento, e desta maneira são descritos também na maioria das normas técnicas.

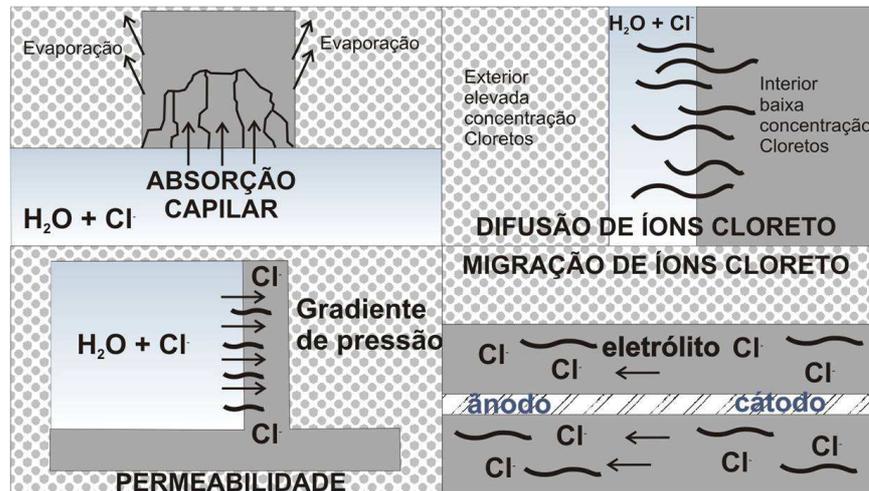
Existem também outras maneiras de expressar esses limites através da relação do íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) pelo íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). A condição alcalina do concreto, responsável pela passivação do aço, é proporcionada pelos hidróxidos, e os cloretos são os principais causadores da despassivação de armaduras (KULAKOWSKI, 1994).

### 2.3.4 Mecanismos de penetração de íons cloreto

Os íons cloreto podem ser encontrados na natureza dissolvidos em água. Quando sólidos, podem depositar-se na superfície do concreto. Em dissolução aquosa, por intermédio de chuvas ou

umidade e através da rede de poros, os agentes agressivos penetram no concreto atingindo as regiões mais internas do concreto armado.

Segundo Cascudo (1997), tais agentes podem ser transportados para dentro do concreto através dos *mecanismos de absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração* (Figura 9).



**Figura 9 - Formas de penetração de íons cloreto na estrutura de concreto**  
Fonte: Helene, 1993.

#### 2.3.4.1 Penetração por difusão

É um mecanismo de penetração que ocorre mais lentamente, onde existe uma diferença de concentração entre os meios que causam a difusão. De acordo com Andrade (1992), as condições de diferença de concentração se processam naturalmente, entre o diferencial de concentração dos meios aquosos, no caso a solução dos poros do concreto e o meio ambiente no qual o concreto está inserido.

Este fato ocorre tanto para substâncias presentes em meio aquoso, como também para aquelas em meio gasoso. Os agentes agressivos mais problemáticos, o  $CO_2$  e os íons cloretos geralmente, têm sua penetração controlada por este fenômeno.

Fick, em 1855, modelou o fenômeno da difusão em regimes estacionários e não estacionários. HELENE (1993) apresenta a solução de FICK no modelo não estacionário, que ponderou o material sólido, semifinito com concentração com concentração superficial constante do íon na solução externa, conforme a **Equação 1**.

$$\frac{C_{eCl^-} - C_0}{C_S - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{e_{Cl^-}}{2 \times (Def_{Cl^-} \times t)^{0,5}} \right] \quad \text{Equação 1}$$

onde :

$C_0$  é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural;  
 $C_S$  é a concentração de cloretos na superfície do componente estrutural, admitida constante;

**erf** é a função de erro de Gauss

**e<sub>Cl</sub>** é a profundidade considerada, geralmente em m;

**Def<sub>Cl</sub>** é o coeficiente efetivo de difusão, variável com a temperatura, geralmente em m<sup>2</sup>/s;

**t** é a duração do tempo considerado, geralmente em s.

#### 2.3.4.2 Penetração por permeabilidade

De acordo com Metha e Monteiro (1994), a permeabilidade pode ser definida pela facilidade que um determinado fluido tem de escoar, através de um sólido sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura deste sólido.

Os cloretos externos penetram no concreto endurecido através deste mecanismo desde que estejam dissolvidos em meio líquido. Sendo assim, o transporte de cloretos será função do fluxo de líquido através do concreto e da concentração de cloretos neste líquido (CALÇADA, 2004). Esse mecanismo é típico de locais como estações de tratamento de águas, de esgotos, tanques industriais, reservatórios, estruturas marítimas, entre outros.

A permeabilidade, em regime laminar, estacionário e não turbulento, pode ser exemplificada pela lei de Darcy, conforme Equação 2 (HELENE, 1993):

$$V = k \frac{H}{X} = \frac{Q}{S} \quad \text{Equação 2}$$

onde :

V é a velocidade de percolação da água, em m/s;

k é o coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s;

H é a pressão de água em m.c.a.;

x é a espessura de concreto percolado pela água, em m;

Q é a vazão de água percolada, em m<sup>3</sup>/s;

S é a área da superfície confinada por onde percola a água, em m<sup>2</sup>.

Depois de efetuar algumas derivadas e integrais em função de x, Helene (1993) apresenta a seguinte Equação 3:

$$X = (2 \times k \times H \times t)^{0,5} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

t é o tempo considerado em segundos.

#### 2.3.4.3 Penetração por Absorção Capilar

Neste mecanismo os cloretos também precisam estar dissolvidos para que ocorra a penetração no concreto. Conforme Nepomuceno (2005), as forças capilares que controlam o ingresso do fluido são geradas pela tensão superficial do líquido que penetra no interior dos

poros e dependem das características do líquido (viscosidade, densidade) e do sólido (microestrutura porosa do concreto).

Andrade (2001) descreve que, em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão e, conseqüentemente, maior a profundidade de penetração da água no concreto.

De acordo com Helene (1993), a absorção capilar pode ser modelada pela lei de Jurin, o qual apresenta uma relação da altura capilar com o tempo de contato com a água Equação 4).

$$h = \frac{2 \times \mu}{r \times \gamma} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

h é a altura de penetração da água no capilar, em m;  
 $\mu$  é a tensão superficial da água, em kg/m ( $75 \times 10^{-4}$ );  
 r é o raio do capilar, em m;  
 $\gamma$  é a massa específica da água, em kg/m<sup>3</sup> (1 kg/m<sup>3</sup>).

Pode-se dizer que a absorção capilar na estrutura possui uma duração limite. Quando atingida por uma determinada altura de ascensão, ou seja, a partir da saturação, o mecanismo predominante é a difusão, pois as forças capilares passam a ser insuficientes para gerar movimentação do fluido, até que as condições se alterem. De acordo com Calçada (2004), há um limite estabelecido para o tempo de absorção, a partir do qual a penetração do líquido pára e o ingresso continua por difusão.

#### 2.3.4.4 Penetração por Migração

A migração se caracteriza pela presença de íons em campo elétrico devido a uma diferença de voltagem que pode ser oriunda da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímica ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (HELENE, 1993).

De certo modo o termo migração de cloretos é usado para a descrição de ensaios acelerados de permeabilidade de íons Nepomuceno (2005), onde o ingresso de cloretos no concreto é forçado pela imposição de uma diferença de potencial.

O transporte de íons neste caso é decorrente da lei de Faraday ( Helene,1993), descrita na Equação 5.

$$m = \frac{i \times t \times a}{n \times F} \quad \text{Equação 5}$$

· Onde :

$m$  – massa do metal corroído, em g  
 $i$  – corrente elétrica em A  
 $t$  – tempo em s  
 $a$  – massa atômica  
 $n$  – valência dos íons do metal  
 $F$  – constante de Faraday (96.493C)

Pode-se dizer que a menor ou maior resistência à migração de íons cloretos está vinculada às propriedades do material que influenciam na penetração dos cloretos. São vários os aspectos relacionados, as diferentes composições, fator a/c e o tipo de fck, são características importantes, para a determinação da resistência do concreto, frente à migração dos íons cloreto.

### 2.3.5 Parâmetros determinantes na penetração de cloretos

São inúmeros os fatores que podem determinar a menor ou maior capacidade de um concreto de resistir à penetração de cloretos, à movimentação dos íons no interior do concreto e a capacidade de combinar cloretos.

#### 2.3.5.1 Relação água/cimento

A relação a/c é um dos fatores que mais exercem influência na penetração dos íons cloreto, pois é determinante para definir características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta (GOMES, 2001). Pode ser afirmado que quanto maior for a relação a/c, maior será a porosidade e permeabilidade do concreto, ocasionando uma maior penetração de cloretos.

Caré (2007) destacou que a relação a/c e o efeito da temperatura sobre a porosidade modificam a estrutura dos poros, ocasionando um aumento na penetração de cloretos, em uma maior relação a/c, relacionado com o aumento da temperatura.

Os poros do concreto servem de caminho para todos os mecanismos de transporte de fluidos, tanto líquidos como gases, têm acesso ao concreto. Quanto maior a relação a/c, maiores as quantidades de cloreto nos concretos. Essa constatação já foi verificada em diversos trabalhos (MONTEIRO, 1996; HOFFMANN, 2001; YANG et al., 2005; entre outros).

Pereira (2001) estudou concretos confeccionados com cimentos CP II F e CP IV, os quais tiveram um crescimento na penetração de cloretos, cerca de nove vezes, quando a relação a/c aumentou de 0,28 para 0,75.

### 2.3.5.2 Composição e tipo de cimento

Os diferentes tipos de cimento apresentam variações na sua composição e finura, contribuindo e atuando de formas diferentes na proteção da armadura. O fato que pode iniciar a corrosão é o tipo empregado de cimento na execução, pois em decorrência da existência do  $C_3A$  e  $C_4AF$ , que são componentes capazes de fixar os cloretos.

É incorreto afirmar que a única influência de capacidade de retenção de cloretos seja o conteúdo de  $C_3A$ , pois outros produtos de hidratação parecem ser capazes de fixar um determinado valor de cloretos. De acordo com Tuutti (1982), a soma das fases  $C_3A + C_4AF$  é a que melhor se correlaciona com a capacidade de fixação de cloretos. Pode - se apontar os silicatos de cálcio também os responsáveis por fixar os íons cloreto. O mecanismo neste caso é diferente do que acontece com o  $C_3A$ , ocorrendo por adsorção física através de forças da superfície (NEVILLE, 1997).

Tessari e Dal Molin (1998) estudaram cinco tipos de cimento (CP II-E, CP I-F, CP IV, CP V, CP V-ARI-RS ), cimentos com e sem adições presentes em suas composições e cinco relações a/c. Os resultados mostraram que os cimentos CP IV, CP V e CP V- ARI- RS foram os que melhor apresentaram resultados ao controle da iniciação da corrosão por cloretos.

Dependendo do tipo de adição utilizada no cimento, as mesmas apresentam uma influência positiva frente à penetração de cloretos, porque além de ter uma característica adicional de fixação de cloretos, decorrentes do aumento dos aluminatos disponíveis, também são capazes de gerar um refinamento dos poros e aumentam a resistência à penetração de agentes agressivos como os íons cloretos.

### 2.3.5.3 Temperatura

A temperatura apresenta um papel fundamental na corrosão da armadura induzida pelos cloretos, por promover uma elevação na movimentação dos íons cloreto, assim aumentando a sua velocidade na corrosão do aço.

Neville (1997) afirma que quando acontece um aumento na temperatura no concreto, também ocorre um aumento do teor de cloretos livres na água dos poros, sendo assim evidenciados melhor, quando empregados em altos teores de  $C_3A$ .

Caré (2007) constatou que o aumento da temperatura simulada em estruturas de concreto após a hidratação modifica a estrutura dos poros, contudo a porosidade total aumenta

com a elevação da temperatura e com isso a penetração de cloretos aumenta em razão do aquecimento.

#### 2.3.5.4 Cobrimento da armadura

O cobrimento da armadura é um fator de proteção para o aço dentro do concreto, pois age como barreira física a entrada de agentes agressivos como a umidade e o oxigênio e atuando também como barreira química ocasionada pelo ambiente alcalino do concreto.

O cobrimento da armadura precisa ser eficiente e conter um teor ideal de argamassa, podendo proteger a armadura do concreto contra os agentes agressivos. O pH da solução destes poros precisa estar acima de 12 e ausência de íons cloretos, segundo Metha e Monteiro (2008), isso acontecendo, é possível afirmar que a armadura esteja passivada, cumprido assim seu caráter químico.

A atual norma em vigor no Brasil, ABNT NBR 6118:2003, recomenda uma espessura do cobrimento, consumo de cimento e uma relação a/c máximo, em razão do tipo de ambiente que a edificação se encontra, menciona ainda uma classe de resistência do concreto mínima.

## 2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Neste item é apresentada uma revisão acerca dos diversos métodos de ensaios para testar a maior ou menor capacidade dos concretos de evitar a penetração de íons cloreto. Os métodos de avaliação apresentados baseiam-se nos diversas meios de penetração e transporte de fluidos no concreto.

### 2.4.1 Resistência do concreto à penetração de íons cloreto

Uma característica importante que prejudica a durabilidade da estrutura de concreto é a difusividade dos cloretos. Os métodos normalmente utilizados para determinar esta propriedade baseiam-se no uso de células de difusão ou pela imersão em soluções salinas. Alguns dos ensaios que usam essas técnicas são apresentados na sequência.

- **AASTHO T259 - Standard Method of test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration - Salt Ponding Test** - Após determinados prazos de cura e pré-condicionamentos, as amostras com espessura menor do que 75 mm, tem uma de suas faces expostas por 90 dias a solução de cloreto de 3% de NaCl e no decorrer é medida a concentração de cloretos em cada fatia de 0,5 polegadas (1,27cm), conforme exemplificada na Figura 10.

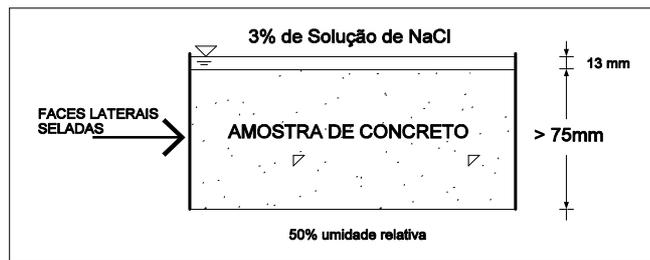


Figura 10 - AASHTO T259 (salt ponding test)

A literatura existente (Yang et al., 2005; Stanish et al., 1997) identifica uma dificuldade em definir realmente o que os resultados significam, pois é retirada pouca informação destas fatias para se determinar o teor de cloretos. O ensaio não prevê um ingresso unidimensional de cloretos, não sendo um mecanismo de difusão de cloretos apenas, pois a face inferior, onde ocorre a redução da umidade relativa, durante o teste os cloretos podem ser arrastados para o concreto por um mecanismo diferente do que pura difusão.

Yang et. al (2005) avaliaram o coeficiente de difusão através deste método e correlacionaram a porosidade capilar com o coeficiente de difusão. A porosidade capilar dos poros (conectividade) é a principal característica dos poros relacionados com o sistema de difusividade de íons cloreto em concretos com cimento Portland.

Segundo Stanish et al. (1997) há uma transmissão de vapor a partir da face saturada do concreto para a face externa seca, levando assim mais água para ser arrastada com o concreto e trazendo os íons cloreto com a mesma, resultando em um mecanismo de absorção capilar. Embora todos estes mecanismos pudessem estar presentes em uma estrutura, a importância de cada um não é refletida por este procedimento de ensaio. A quantidade relativa de cloretos que penetram por absorção capilar, em relação ao montante que entram por difusão, será maior no teste de 90 dias, do que quando comparado com as quantidades relativas que entram durante a vida útil de uma estrutura.

É consenso entre os autores citados que este método apresenta deficiências em determinar a concentração de cloretos em concretos de alto desempenho. A concentração de íons cloreto presente nestes concretos é insuficiente, para, em um período de 90 dias, ser identificada com valores significativos. Estes fatos implicam em se proceder ao experimento por período de tempo com duração superior a 90 dias, quando a avaliação é feita em concretos de alto desempenho.

- **Nord Test NT Build 443 - Bulk Diffusion Test.** Este procedimento é semelhante ao procedimento especificado pela AASTHO T259. Uma das modificações refere-se à preparação da amostra, que antes de entrar em contato com a solução salina, é saturada em água e cal, segundo Stanish et.al (1997), para evitar uma sorção inicial. Também são seladas as faces laterais e a face inferior, deixando a face superior em contato com uma solução de 2,8M de NaCl em um prazo mínimo de 35 dias. Para avaliar o teor de cloreto no concreto das amostras é feita extração de amostras em pó em diferentes profundidades. A Figura 11 apresenta o esquema do ensaio.

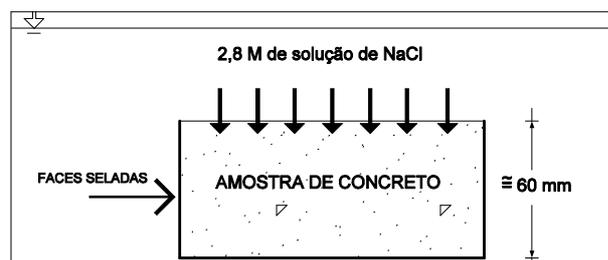


Figura 11 - Sistema do ensaio do Nordtest ( STANISH et.al, 1997)

Embora o *Nord Test NT Build 443* seja capaz de modelar a difusão do cloreto no concreto, ainda é um teste de longo prazo. Para os concretos com baixa resistência são necessário 35 dias no mínimo e para os concretos com maior desempenho deve ser prorrogado até os 90 dias, como o *Salt Ponding Test*.

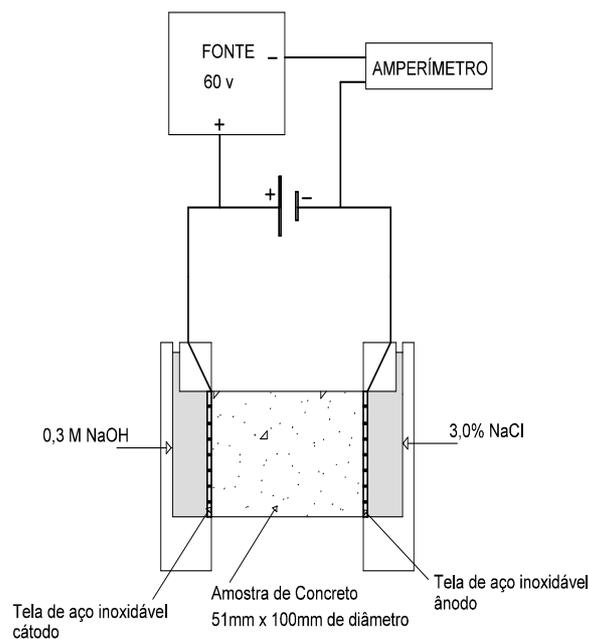
- **Soaking Test (EPCI – Ensaio de penetração de cloretos por imersão).** O ensaio também é baseado na AASTHO T259, descrito por Wee et.al (2000). As amostras são submetidas a determinados tempos de cura, e depois elas são imersas em solução de NaCl, com concentração de 19,38 ppm. No período determinado de 90 dias, os corpos-de-prova são retirados do tanque e aspergidos com uma solução de  $\text{AgNO}_3$ , avaliando a profundidade de penetração dos íon cloreto.

Conforme Siqueira (2008), a utilização do ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI), por se aproximar das situações reais de penetração dos íons cloreto, possibilita uma confiabilidade maior na medida de desempenho dos concretos.

A avaliação dos concretos por meio destes métodos demanda um período de tempo longo, pois necessita de um pré-condicionamento dos corpos-de-prova e um período para a execução dos ensaios, normalmente estimado de 90 dias. Em função deste fato, pesquisadores desenvolveram métodos acelerados, entre eles o ensaio mais citado no meio científico é o

“ASTM C1202–07 – Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resistent Cholride Ion Penetration”, também normatizado como AASTHO T277 - The Rapid Chloride Penetration Test- RCPT. Alguns métodos de ensaios acelerados de pentração de íons cloreto são:

- **AASTHO T277 ou ASTM C1202 - Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resistent Cholride Ion Penetration (Rapid Chloride Permeability Test – RCPT).** As amostras, colocadas entre meia-células, ficam com uma de suas faces em contato com solução de NaCl e a outra com solução de NaOH. São submetidas a uma diferença de potencial de 60V, durante um período de 6 horas, no qual é realizado um monitoramento da corrente passante, em intervalos de 30 min. Na sequência é calculado a carga total passante nas amostras, registrada em Coulombs. A Figura 12 demonstra o sistema esquemático do método.



**Figura 12 - AASTHO T277 (ASTM C1202) - esquema do teste.**

Withing (1981) apud Stanish et al. (1997) desenvolveu este método eletroquímico de penetração de cloretos, pela necessidade de analisar materiais que serviam de proteção para os tabuleiros de pontes contra a ação de sais de degelo. A compreensão do método foi baseada na movimentação de íons cloretos por ação de um campo elétrico, que, por possuírem carga negativa, migram em direção a outro pólo eletroquimicamente positivo. O procedimento do ensaio é controlado através da corrente passante, sendo que o aumento da mesma pode ser correlacionado com uma maior quantidade de cloretos que penetra do concreto, onde o

acréscimo da concentração de cloretos diminui a resistividade do concreto. Apesar deste método ser muito utilizado no meio científico, principalmente na América do Norte, existem muitas controvérsias em relação aos princípios do ensaio (ANDRADE et.al, 1993).

Segundo Kulakowski (1994), o método é acelerado, o que não retrata as condições normais de exposição de um concreto ou argamassa, pois apresenta uma diferença de potencial elevada (60 V) tornando o ensaio um tanto agressivo. Este fato relata que as análises realizadas só servem para uma avaliação qualitativa.

No boletim técnico publicado pela Grace Construction Products (2006) comparando métodos de ensaio, é destacado o fato do ensaio não medir a resistência à penetração dos íons cloreto, mas sim mede a resistividade do concreto, e que além do mais não representa uma situação real, pois não há condição em que o concreto seja exposto a uma diferença de potencial de 60V na vida útil das estruturas.

Seguindo a mesma linha de pensamento, Shi et.al (1998) destacam que a medição da corrente passante especificada pela AASHTO T277 ou ASTM C1202 não é um método correto para avaliar a penetração rápida de cloretos em concretos com uso de materiais cimentícios. Os autores alegam que estes materiais causariam reduções na resistividade elétrica em mais de 90%, em função da modificação na composição da solução dos poros, fator esse pouco importante no transporte de íons cloreto no concreto.

Apesar de este teste apresentar muita controvérsia, Isaia (1996) conclui que o método da ASTM C1202 pode ser considerado válido para situações de controle de parâmetros de qualidade quando feito para concretos com mesmos componentes e proporções de mistura e é aplicável em quase todos os tipos de concretos, principalmente quando se deseja comparar resultados em relação a outro de referência.

- **Métodos com modificações da ASTM C1202.** Existem alguns trabalhos em que os autores buscam anular aspectos negativos do procedimento original, como, por exemplo, o aumento da temperatura no decorrer do ensaio, levando a adaptações na metodologia da ASTM. Destaca-se Andrade (1993) que diminuiu, em algumas amostras, a diferença de potencial para 12V a partir dos primeiros 30 min de ensaio.

Conforme Pereira (2001), o método proposto por Andrade (1993) apresenta resultados mais confiáveis. Constatou em sua pesquisa, ao relacionar o ensaio normatizado da ASTM C 1202 com o proposto de Andrade (1993), que existe uma boa correlação entre os mesmos, porém o período de ensaio passa a ser mais longo novamente. A autora coloca ainda que,

quando se deseja medir a penetração de cloretos e o cronograma disponível para a avaliação do material é curto, o ensaio da ASTM C1202 pode ser utilizado, porém seus resultados devem ser encarados com precauções.

- **Técnica de Migração Elétrica (Electrical Migration Technique).** Os testes de migração elétrica são realizados em uma célula com duas câmaras e a amostra no meio fazendo a divisão. A amostra pode ser de qualquer tamanho, mas geralmente tem um diâmetro de 100mm por um comprimento de 15 a 50 mm. A espessura do disco pode afetar a duração do teste, mas é necessária uma dimensão suficiente, para evitar influências entre o agregado e a interface. Se a dimensão do agregado for muito próxima da espessura da amostra, pode existir a formação de um caminho preferencial pela zona de transição pasta-agregado e pode se estender pela maior parte da amostra. Isto proporcionará um caminho mais rápido para o movimento de íons cloreto do que existe na maior parte do concreto. Para evitar isto a espessura da amostra deve ser maior que o máximo diâmetro do tamanho do agregado (MCGRATH, 1996 apud STANISH et al., 1997).

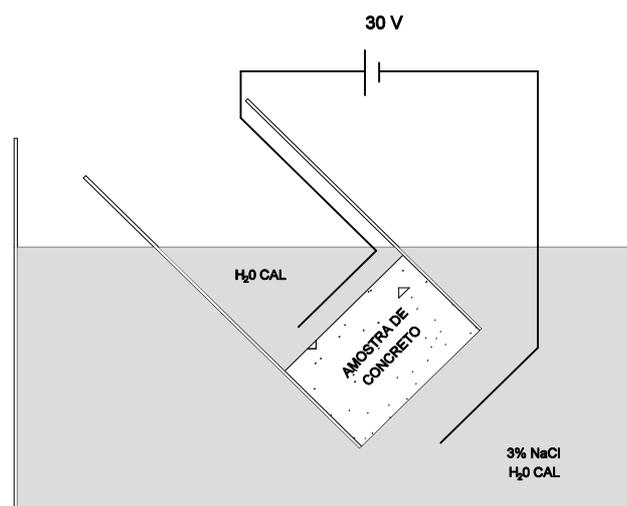
O teste inicialmente possui na câmara do cátodo solução de íons cloreto e na câmara do ânodo ausência de cloretos, onde há a presença de água destilada ou solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ . A tensão então é aplicada para induzir os íons cloreto através do concreto até a câmara do ânodo e a solução nesta câmara é periodicamente controlada, coletando-se amostras para determinar a concentração de cloretos nessas amostras. A mudança da concentração de cloretos em função do tempo permite um cálculo dos coeficientes de difusão, através de modelo matemático (STANISH et.al, 1997).

A diferença mais importante a ser destacada entre os métodos de ensaio é a tensão aplicada. Isto pode afetar diretamente o tempo necessário para realizar o teste. A tensão deve ser suficientemente baixa para evitar o aquecimento da amostra e suficientemente alta para garantir uma curta duração do teste. Apesar de uma grande variedade de tensões nas pesquisas, encontra-se na literatura a descrição sucinta que os intervalos apropriados seriam entre 10 e 12 V (GJØRV and ANDRADE, 1993; DELEGRAVE, et.al, 1996 apud PEREIRA, 2001).

- **Outros ensaios:** Stanish et.al (1997), fazem uma longa revisão da literatura sobre a avaliação da penetração de cloretos e cita outros ensaios acelerados, como o “Teste de Migração Rápida”. [The Rapid Migration Test, proposto por Tang e Nilson (1991)], os

quais demonstram as técnicas de resistividade, penetração por pressão, métodos indiretos ( como permeabilidade de líquido ) e absorção.

Tang e Nilson (1991), propuseram uma variação na convencional célula de migração, o qual aplicaram uma tensão de 30V, usualmente comum em testes de migração, exceto pelo fato que a solução de NaCl não é monitorada, e depois de 8 horas de ensaio as amostras são partidas e uma solução de nitrato de prata é aspergida em suas partes. O nitrato de prata é uma técnica colorimétrica, que serve para indicar a presença ou ausência de íons cloreto na amostra. O íon cloreto presente no concreto se vincula com a prata para a formação de AgCl, resultando uma cor esbranquiçada. Em ausência de íons cloreto, quando a prata reage com hidróxidos presentes no concreto, o resultado é uma cor amarronzada. A solução de  $\text{AgNO}_3$  é utilizada em concentração de 0,1 N, a cor muda em função da concentração solúvel de cloreto que corresponde a 0,15% da massa de cimento, conforme Figura 13.



**Figura 13 - Célula de migração**

Fonte: Tang e Nilson, 1991.

O **CTH Test** conhecido como The Rapid Migration Test é capaz de enfrentar as críticas do RCPT relacionadas a movimentação dos íons cloreto e seu aumento de temperatura. No entanto conforme Stanish et.al (1997), como em um caso típico de teste de migração, a inclusão de materiais condutores como o metal e o carbono, poderia criar um curto-circuito na célula CTH, como sendo transportada pelo condutor, em vez dos íons presentes na solução dos poros. Se o condutor não causar um curto-circuito na célula (ou seja se uma peça de aço é paralelo à superfície) existe a possibilidade dela reagir com os íons cloreto e afetaria a circulação dos mesmos. No entanto, se os íons cloreto não penetram até a profundidade do aço, isso não seria um problema.

### 2.4.2 Técnicas de Medição Indireta

Pereira et.al (2005), adotaram alguns ensaios e adaptaram outros para avaliar a resistência à penetração de cloretos, através do método de **Ciclos de imersão parcial e secagem**. Desta forma a aceleração intencional da deterioração foi feita através de ciclos de imersão e secagem. Os autores empregaram amostras de concreto com 91 dias de idade. Cada ciclo teve duração de 1 semana, iniciando com imersão parcial dos corpos de prova por 2 dias, em recipiente com solução à 1% de NaCl, e, após este período, secando por 5 dias. É feito um acompanhamento eletroquímico (realizado com Gecor 6, que mede a intensidade da corrente) ao final de cada semiciclo. Os corpos de prova foram submetidos a repetições de ciclos até completarem 171 dias, cujo período segundo os autores foi suficiente para apresentar resultados significativos.

O método descrito pode ser considerado como sendo um processo de absorção capilar, por estar imerso parcialmente e quando a amostra atinge a saturação máxima a penetração passa a ocorrer pelo mecanismo de difusão. Este ensaio parece corresponder às expectativas da obtenção de valores que apontam a penetração de íons cloretos em profundidade possível de ser identificada. A única questão a ser avaliada é a questão do tempo de execução do ensaio, já que o mesmo se totaliza em 171 dias.

Segundo Jucá (2002), o método de Ciclos de imersão e secagem não é normatizado ainda, porém esta técnica vem sendo muito utilizada em pesquisas em nível mundial. Os ciclos de imersão e secagem são importantes para avaliar a durabilidade, principalmente para simular o estado das peças estruturais em contato com a água do mar.

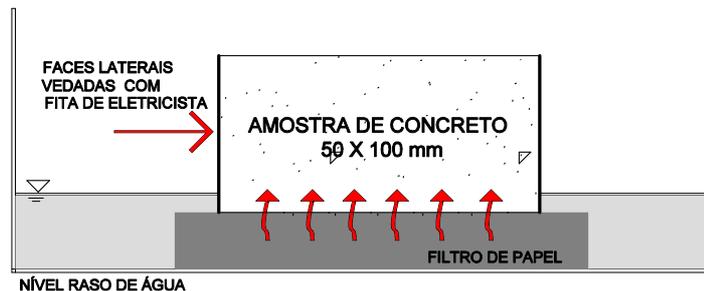
A permeabilidade do concreto ao longo do tempo tem sido uma propriedade de interesse de inúmeras pesquisas. Há muitos métodos utilizados para avaliar a permeabilidade da água e do gás. De acordo com Stanish et.al (1997) a permeabilidade de líquidos é geralmente medido de duas maneiras, a primeira é a profundidade de penetração em um determinado momento, ou taxa de entrada e saída. A variação da taxa de ingresso de entrada e saída e o tempo, também podem ser medidas.

Embora muitas técnicas tenham sido desenvolvidas em pesquisas, que são capazes de medir a permeabilidade do concreto à água, estas técnicas não são adequadas para avaliar a capacidade que o concreto tem para resistir ao ingresso de íons.

A sortividade (**sorptivity**) do concreto é uma propriedade que mede o fluxo de fluídos em concretos não saturados. Sortividade é uma medida das forças de capilaridade exercidas pela estrutura dos poros causadas por fluídos, e também pode ser tratada por taxa de absorção.

Segundo o *Draft Standard on Surface Sorptivity of Concretes*, (ASTM Draft Standard), citado por Stanish et al. (1997) para executar o método é necessário uma escala, cronômetro e um recipiente raso com água. A amostra passa por um pré-condicionamento, que consiste em uma secagem por 7 dias em estufa a 50° C e em seguida submetida a um resfriamento em recipiente vedado por 3 dias. As faces são seladas normalmente com fita adesiva.

A massa inicial da amostra é verificada no tempo zero e é imersa em uma profundidade de 5- 10 mm na água. Na sequência de tempos (1, 2, 3, 4, 5, 9, 12, 16, 20 e 25 min), a amostra é removida da água, o cronômetro parado, o excesso da água retirado com pano úmido e então a amostra é pesada e é colocada novamente na água e o cronômetro recomeça. Na Figura 14 é mostrada a representação do teste.



**Figura 14 - Representação esquemática do método**

Fonte: STANISH et.al, 1997.

Caré (2007) usou este método para avaliar a penetração de cloretos em materiais cimentícios combinado com um método colorimétrico, detectando a presença de íons cloreto através da mudança de cor. Foi possível identificar um aumento da massa durante a difusão, devido à penetração dos íons cloreto na amostra.

O teste de sortividade, evita muitas dificuldades encontradas no método RCPT e é capaz de avaliar o concreto contendo materiais condutores, mas tem limitações, pois é capaz de analisar apenas a superfície do concreto, onde a sortividade do concreto é afetada pela condição de superfície, pelo menos no período especificado para execução do método.

Para uma melhor avaliação dos vários métodos de penetração de cloretos, é apresentado, a seguir uma tabela com o resumo dos métodos de ensaio, descritos

anteriormente, agrupados em três categorias principais: longo prazo, curto prazo e outros. Um resumo de algumas vantagens e desvantagens de cada procedimento também é apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Principais métodos de ensaio à penetração de cloreto.**

Método de ensaio		Considera a movimentação de íons cloreto	Temperatura constante	Afetados pelos condutores no concreto	Duração aproximada do teste
Longo Prazo	AASTHO T259(salt ponding)	sim	sim	não	90 dias depois da cura e condicionamento
	Bulk difussion (Nordtest)	sim	sim	não	40-120 dias depois da cura e condicionamento
Curto Prazo	RCPT(T277)	não	não	sim	6 horas
	Migração Elétrica	sim	sim	sim	Depende da tensão e concreto
	Rapid Migration (CTH)	sim	sim	sim	8 horas
Outros	Ciclo de Imersão e Secagem	não	sim	não	91-171 dias depois da cura e condicionamento
	Sorptivity Lab.	não	sim	não	1 semana depois do condicionamento

Fonte: Stanish et.al, 1997.

Com o estudo aprofundado dos métodos de avaliação da penetração de íons cloreto, é possível identificar os ensaios apropriados para serem usados na pesquisa. Apesar de todas as críticas apresentadas ao método segundo a ASTM C1202-07, este será adotado pelo fato de ser um ensaio normatizado, ser um ensaio de curta duração e segundo a literatura um ensaio de fácil correlação com os demais métodos. Como foi apresentado a sortividade também é um método usulamente empregado, sendo desta forma também elencado para caracterizar a durabilidade dos concretos em estudo. Na instituição onde esta pesquisa foi desenvolvida, o método proposto pelo RILEM TC166-PCD (1999) vem sendo empregado para testar a absorção de água dos materiais. O método é muito próximo daquele de sortividade exposto por Stanish et al. (1997) e pode ser empregado também com solução que contenha íons cloreto.

## 2.5 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

As pesquisas que estudam a utilização dos agregados reciclados estão se tornando cada vez mais freqüentes, no entanto é preciso estudar as suas propriedades, tanto de natureza mecânica, como relacionado à sua durabilidade, pois o desempenho do concreto é modificado quando o agregado natural é substituído pelo reciclado.

### 2.5.1 Propriedades dos Agregados Reciclados

A definição de *agregado reciclado* coloca que é um material granular, resultante de um processo industrial envolvendo o processamento de materiais inorgânicos, previamente e exclusivamente utilizados na construção, e aplicados novamente na construção (KOPPEN citado por PIETERSEN et al., 1998).

O agregado reciclado de RCD normalmente é heterogêneo, o que é atribuído ao grande número de distintos materiais utilizados na construção civil. Por isto, os concretos com agregados reciclados podem apresentar uma grande dispersão de resultados em relação à resistência mecânica, podendo inviabilizar seu uso em elementos estruturais (PRADO, 2006). No entanto as diferentes propriedades do concreto reciclado e o convencional dependem, entre outras variáveis, do teor de agregado natural substituído, das características dos agregados reciclados utilizados, da quantidade de contaminantes presentes no agregado e da quantidade de finos incorporada.

#### 2.5.1.1 Composição Granulométrica

Os agregados reciclados, tanto miúdos quanto graúdo, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura um pouco maior. O tipo e a granulometria do resíduo, e o tipo de britagem, influenciam consideravelmente a granulometria final dos agregados reciclados produzidos (BAZUCO, 1999; LIMA, 1999).

Conforme Cabral (2007), para se obter um uso satisfatório em determinadas aplicações, o material reciclado produzido deve atender a certas exigências de granulometria e a uma presença máxima de contaminantes, além de outras exigências de estabilidade e durabilidade exigidas.

Quando se trata de distribuição granulométrica de agregados reciclados, percebe-se que ainda não existe um consenso claro no meio técnico científico, portanto a curva granulométrica não deve ser levada como parâmetro exclusivo para a seleção de agregados a

serem utilizados nos concretos (LEVY, 2001). No entanto a distribuição granulométrica deve ser usada como forma de orientar e prever a trabalhabilidade do concreto onde será inserido.

Em sua pesquisa Leite (2001), constatou que as curvas granulométricas do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado evidenciaram materiais com uma granulometria contínua, apontando um aspecto positivo para a produção de concretos, evidenciando um melhor arranjo entre as partículas.

#### 2.5.1.2 Massa específica e massa unitária:

Normalmente a maioria dos agregados reciclados apresenta massa específica e massa unitária menores que as dos agregados naturais. Este fato é explicado pelo fato de que os resíduos provenientes da construção e demolição são compostos de materiais porosos (CABRAL, 2007). A massa unitária é influenciada tanto pela porosidade dos agregados reciclados, quanto pela forma irregular das partículas dos agregados, o que contribui para redução da mesma.

Na sua pesquisa, Lovato (2007) constatou que a massa unitária dos agregados reciclados possui um valor inferior à dos agregados naturais, e que isto se deve provavelmente à forma e à granulometria dos agregados. Na literatura inúmeros autores, tais como Xiao et al.(2005) e Tu et al.(2006), apresentam valores de massa específica e massa unitária para os agregados reciclados de concreto menores que as dos agregados naturais por eles utilizados.

De acordo com Cabral (2007), esse fenômeno pode ser explicado, tanto para os agregados reciclados de concreto quanto de argamassa, que ambos são constituídos por uma considerável parcela de matriz de cimento. Geralmente essa matriz de cimento é menos densa que os agregados naturais, além do que comumente há uma inclusão de poros, assim tornando esses agregados menos densos que os naturais. De um modo geral, a massa específica e a massa unitária desses agregados reciclados irão depender exclusivamente da matriz de cimento.

#### 2.5.1.3 Absorção de água

Considerando que os agregados reciclados são compostos por materiais porosos como alvenarias e argamassas, eles apresentam taxas de absorção muito elevadas. Entretanto, é fundamental avaliar esta propriedade para que não interfira na durabilidade e nem dificulte a produção de argamassas e concretos (LIMA, 1999).

No estudo realizado por Bazuco (1999) com agregados reciclados de concreto, a taxa de absorção média, medida em 24 horas, foi de 8,45 % e foi também observado que quase toda água é absorvida até os primeiros 30 minutos do contato do material com a água.

Vários trabalhos com RCD misto apresentaram valores altos de absorção para os agregados reciclados. No trabalho de Leite (2001), foi caracterizada uma absorção de 8,60% para o agregado miúdo e 4,95% para o agregado graúdo. No entanto, na pesquisa de Vieira (2003), foram observadas taxas de absorção maiores, que correspondem a 11,08% para o agregado miúdo e 6,04% para o agregado graúdo. Nunes (2007) verificou que o agregado graúdo reciclado apresentou uma absorção média de água equivalente a 13,09% em um tempo de 24h de imersão. Ficou constatado que a taxa de absorção total do agregado graúdo reciclado foi de 80%, do total absorvido, já no primeiro minuto.

A absorção de água dos agregados reciclados influencia na relação final do fator a/c nas misturas e na trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco (LEITE, 2001). Sendo assim, é muito importante o estudo desta característica, a fim de evitar maiores interferências no concreto.

O estudo da absorção de água em agregados reciclados é de extrema relevância, sendo um material mais poroso que o agregado convencional ele pode interferir no comportamento do concreto quando incorporado na mistura, podendo prejudicar a durabilidade e a resistência do novo material, mas o maior prejuízo é no estado fresco.

#### 2.5.1.4 Considerações sobre os agregados reciclados de concreto

Algumas pesquisas relacionadas ao estudo do concreto atestam o grande potencial do material. No Brasil, os estudos concentram-se, basicamente, no tratamento das sobras de concreto em centrais dosadoras e ao reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (BUTTLER, 2003). Dentre as principais diferenças aplicadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados de concreto pode-se apontar alguns dados bastante relevantes, citando suas principais propriedades mecânicas.

Para Ângulo et al. (2002), a atual tecnologia empregada dentro das centrais de reciclagem, no Brasil, não permite que os agregados reciclados sejam utilizados em concretos. Por causa da inexistência de normas brasileiras, os agregados reciclados têm que seguir as especificações internacionais, e, na maioria das vezes, os agregados não se enquadram nos critérios normativos.

Apesar do fato dos RCD possuírem uma composição heterogênea e por muitas vezes não se enquadrarem em critérios específicos, estes apresentam grande potencial para serem

recicladados, sendo a produção de agregados reciclados a sua maior vertente. Os agregados reciclados normalmente são mais porosos, menos resistentes, apresentando ainda uma maior absorção de água que os agregados naturais (CABRAL, 2007).

Os agregados em sua maioria apresentam um custo de produção inferior ao dos agregados naturais, sendo que com a sua utilização, ainda há um “ganho ambiental”, uma vez que evita - se extrair matéria-prima natural e ocasiona um destino final a um tipo de resíduo que atinge grande percentual total do RSU (resíduo sólido urbano). Deste modo, considera-se que estes agregados são de grande potencial de utilização como insumo na construção civil. Zordan (1997) e Leite (2001), entre outros, avaliaram a viabilidade técnica da utilização desses materiais e concluíram que agregados reciclados são apropriados para serem utilizados em concretos.

Segundo Brito et al. (2005), o processo de britagem e moagem para fabricação dos agregados reciclados afeta bastante as características desses agregados. O número de micropartículas soltas entre os grãos do agregado reciclado e o surgimento de microfissuras em sua superfície, oriundas do processo de britagem, são efeitos que prejudicam e comprometem o desempenho dos mesmos (KATZ, 2004).

A granulometria desejável para os agregados reciclados a serem utilizados na produção de concretos, conforme Schulz e Hendricks (1992), pode ser alcançada através de sucessivas britagens do resíduo. Já a mais desejável forma das partículas pode somente ser alcançada através de uma britagem primária seguida de uma secundária. Entretanto, sob o ponto de vista econômico, uma única britagem é usualmente o melhor processo.

Metha e Monteiro (2008) afirmam que a trabalhabilidade dos concretos está relacionada com a facilidade de mobilidade e com a resistência à segregação ou à exsudação. Estas características vão depender de vários fatores, como consumo de água, consumo de cimento, aditivos e das características dos agregados. Agregados muito angulosos ou com muitos finos necessitam de mais água para atingir uma dada consistência, sem prejudicar a trabalhabilidade da matriz.

Este tipo de granulometria mais angular resulta em um maior atrito interno entre os agregados, o que requer maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido. Deste modo, é interessante salientar que o agregado reciclado, quando incorporado ao concreto, torna a mistura mais coesa, ou seja, conseqüentemente com menor

trabalhabilidade quando comparado ao concreto de mesmo traço com agregado natural (PRADO, 2006).

De acordo com Vieira (2003), os concretos com agregados reciclados tendem a apresentar um abatimento menor com relação aos concretos com agregados naturais. Quanto maior a dimensão máxima do agregado reciclado, menor tende a ser o abatimento obtido. Para minimizar estas perdas, algumas precauções podem ser tomadas como, por exemplo, evitar a utilização de cimentos com altos teores de álcalis e de alta resistência, pois o calor de hidratação, deste tipo de cimento, pode dificultar a trabalhabilidade dos concretos.

Segundo Eguchi et. al ( 2007), com o aumento do teor de agregado graúdo reciclado na mistura do concreto, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade diminuem e a secagem por retração aumenta. Entretanto, para estimar a diminuição da qualidade do concreto, pelos percentuais de substituição pelos reciclados, é preciso ajustar o teor de substituição, para que a qualidade exigida do concreto possa ser assegurada, visto que o desempenho estrutural e a trabalhabilidade são igualmente compensados com o concreto original.

Para agregados que são previamente saturados antes da mistura, ocorrerá a mobilização de água para a pasta fresca. A água absorvida pelo agregado pode ser considerada como sendo água livre e, portanto quando mobilizada na mistura fresca acarretará um aumento da relação água/cimento na zona de transição, fato este que aumentará o índice de vazios e resultará na redução da resistência (BUTTLER, 2003). Em oposição, Cabral et al. (2007) afirma que a água de pré-molhagem absorvida primeiramente pelos agregados reciclados, posteriormente torna-se disponível dentro da mistura, podendo hidratar as partículas de cimento não-hidratadas, além de ajudar no processo de cura do concreto. A presença de água no agregado propicia também a formação de uma boa zona de transição entre a nova pasta e o agregado reciclado.

Bazuco (1999) afirma que a utilização de agregados graúdos reciclados secos não interfere sensivelmente nas propriedades dos concretos, em relação aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados saturados. Porém Butler (2003) considera que agregados não saturados misturados simultaneamente os demais materiais da mistura, irão absorver grande quantidade de água e partículas de cimento, acarretando uma densificação do agregado, enfraquecendo a zona de transição, provocando uma diminuição de resistência.

É preciso ser discutido, segundo Vieira (2003), a alta taxa de absorção de água dos agregados. Por ser um agregado mais poroso, obviamente irá precisar de mais água para ter a mesma trabalhabilidade que concretos com agregados convencionais. Delimitados neste fator, muitos autores realizam misturas de concretos variando a porcentagem de água para que o abatimento e a trabalhabilidade sejam satisfeitos. No entanto a relação a/c é alterada, e em virtude disso a resistência desses concretos também acaba se alterando, causando uma impossibilidade de comparação direta entre concretos convencionais e reciclados.

De fato o que pode ser observado é que o desempenho dos concretos com agregados reciclados no que diz respeito à trabalhabilidade, é considerado insatisfatório devido à perda de abatimento sofrida por estes concretos, principalmente com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado nas misturas. Sendo que inúmeras pesquisas enfatizam a pré-molhagem com um fator essencial para a utilização dos agregados reciclados.

Os estudos de Carrijo (2005) demonstraram que além de influenciar na trabalhabilidade e no módulo de elasticidade do concreto, a utilização dos RCD também pode influenciar diretamente na resistência à compressão. Os valores das resistências dos concretos produzidos com agregados reciclados ainda são bastante complexos, pois a literatura apresenta resultados diferentes quanto às resistências, podendo ocorrer um acréscimo na resistência dos concretos ou decréscimo quando comparados com os agregados naturais, pois são inúmeros os fatores a serem analisados.

Zordan (1997) e Lovato (2007) apontam que os concretos com agregados reciclados tendem a apresentar resistências inferiores, quando comparados com as resistências obtidas com concretos de referência (convencionais), principalmente com valores de 100% de substituição de AGN pelo AGR.

Entretanto, segundo Buttler (2003), para a resistência à compressão foi notado um relevante aumento no seu valor em relação ao concreto com agregados naturais. Isto pode ser explicado pelo processo de cura úmida interna, a grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento presente nos agregados e a qualidade do agregado reciclado.

Para Leite (2001), a resistência à tração em concretos confeccionados com agregados reciclados não obedecem a um comportamento uniforme. A pesquisadora afirma que a resistência à tração leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, o qual pode-se afirmar que a aderência é relevante entre a matriz do concreto e a superfície dos grãos do agregado de matérias com forma mais angular e textura mais rugosa. Desta

forma, ao avaliar as características de matérias reciclados a autora relata que este material oferece vantagens às propriedades de aderência, sendo que o comportamento esperado da resistência à tração de concretos produzidos com agregados reciclados seria uma melhoria da mesma.

Os resultados de Silva (2006) já são diferentes. O autor aponta que os valores de resistência à tração decrescem à medida que a substituição dos AGN pelos AGR aumenta dentro da matriz de concreto, devido ao empobrecimento do traço.

Na literatura existem inúmeros trabalhos realizados fixando-se a relação a/c, em muitos casos os valores das resistências em concretos reciclados foram significativamente superiores em relação aos valores do concreto de referência. Observa-se, portanto, que não há um consenso ainda sobre o uso de agregados reciclados, permanecendo ainda inúmeras incógnitas a serem estudadas.

### **2.5.2 Penetração de Cloretos em Concretos com Agregado Reciclado**

Os agentes responsáveis pela deterioração do concreto são fatores bastante preocupantes na avaliação da vida útil das estruturas, pois uma durabilidade inadequada pode manifestar sérias complicações, comprometendo a utilidade das mesmas bem como a sua segurança.

Para que os materiais alternativos sejam utilizados há uma necessidade de conhecer o seu comportamento diante de condições que afetem as propriedades do concreto. A durabilidade do concreto, com agregados naturais ou reciclados, é resultado da facilidade ou dificuldade que os fluídos têm para se transportarem dentro do concreto, identificando a sua permeabilidade. A movimentação desses elementos vai depender da estrutura da pasta do cimento hidratada (NEVILLE, 1997).

De modo geral, o concreto com agregados reciclados precisam responder satisfatoriamente ao transporte de fluídos, para que se possa avaliar a durabilidade destes concretos. Os agregados reciclados quando utilizados em uma nova matriz de concreto, são necessários alguns cuidados importantes, ou seja, tomar algumas precauções, para que se tenha um concreto com desempenho apropriado.

Olorunsogo e Padayachee (2002) analisaram alguns fatores de desempenho de durabilidade, tais como condutividade de cloretos, permeabilidade ao oxigênio e absorção de água de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCD, encontrando para todos, desempenhos inferiores ao concreto de referência. Especificamente para a condutividade de cloretos, o índice apresentado para os concretos com agregados reciclados

aumentou em 73,2%, aos 28 dias, quando comparado ao índice de referência. Segundo os mesmos autores, a redução no desempenho quanto à durabilidade demonstrada pelos concretos reciclados ocorre por conta das fissuras criadas nos agregados durante o processo de reciclagem, as quais se tornam um fácil caminho para a passagem de fluidos e agentes agressivos, além da presença de uma estrutura por si mais porosa. Contudo, sabe-se que se o concreto confeccionado com os agregados reciclados tiver uma argamassa de baixa permeabilidade, esta impedirá a passagem dos agentes deletérios, impedindo-os de alcançarem os agregados.

De acordo com Poon e Kou (2006), a porosidade total e o diâmetro médio dos poros do concreto aumentam, com o aumento do teor de agregados reciclados de concreto. Além do que ficou evidente que quanto maior o teor de substituição do agregado gráudo reciclado, menor é a resistência à penetração de íons cloreto. No entanto, o emprego conjunto de substituição de 25% de cimento por cinza volante melhorou a resistência à penetração de íons cloreto e o diâmetro dos poros, e reduziu a porosidade total dos agregados reciclados de concreto.

Segundo Levy (2001), os agentes agressivos do meio ambiente penetram e se difundem pela estrutura de poros, será importante estudar a absorção por imersão caracterizando melhor a estrutura dos poros, uma vez que permite avaliar a quantidade total de água absorvida ao contrário da absorção capilar que só ocorre em casos especiais em que o concreto não esteja saturado.

Quando o assunto em questão é a agressividade dos íons cloreto, os resultados obtidos com a adição de escória normalmente são excelentes. Dhir et al. (2006) comentam sobre a capacidade de combinação dos íons cloreto em concretos contendo escória. Segundo os autores, pastas constituídas parcialmente por escórias, têm maior capacidade de fixação de cloretos do que pasta de cimento Portland puro e de acordo com aumento do teor de escória eleva-se também a taxa de combinação.

Costa (2001), em seus estudos, concluiu que a utilização da escória ocasiona redução na penetração de cloretos, entretanto, quanto maior a finura desta, maior também será a corrente passante testada pelo método ASTM C1202-07. O mesmo autor afirma que a alteração do teor de substituição de 35% para 70%, utilizando escórias de mesma finura, apesar de diminuir a resistência à compressão, diminui também a taxa de penetração de cloretos

Segundo conclusões de Schneider (2005), os concretos contendo apenas cimento Portland como aglomerante, apesar de atingirem resistências relativamente altas em todas as idades, necessitam de custo elevado (baixas relações a/c) para atingirem resistência adequada à penetração de cloretos, no máximo, comparáveis aos concretos com escória. O autor ao analisar concretos com CPV-ARI, escória e ativador químico ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), destaca que a mistura contendo 50% de escória e 4% de ativador, indicando a grande potencialização da escória, na proteção contra a penetração de cloretos. Destacou também o efeito da ativação, quanto à resistência à compressão, relatando comportamento bastante similar à mistura utilizando CPV-ARI, sem adições.

Villagrán- Ziccardi et al.(2008) analisaram concretos produzidos com agregado reciclado de concreto, com diferentes níveis de substituição, e relação a/c de 0,35 a 0,60. Os agregados utilizados também apresentaram diferentes tipos de fck. Constataram que os concretos convencionais e concretos reciclados, quando expostos a mesmos processos de tratamento e cura, apresentaram profundidades similares de cloretos solúveis em água, quando a relação a/c foi superior a 0,40.

Pode ser observado, que a durabilidade de concretos reciclados, é um aspecto de extrema relevância, pois existem várias pesquisas e resultados conflitantes, sendo um aspecto muito estudado e que possui muitas dúvidas sobre as propriedades dos agregados reciclados de concreto frente à penetração de cloretos.

O uso do agregado reciclado de concreto é um tema bastante complexo dentro do meio acadêmico, que depende de inúmeros fatores. Por se tratar de um material com alta porosidade, é indispensável analisar suas propriedades e ter o conhecimento de suas características, para que essas não influenciem no estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade, propriedade essas essenciais para o bom desempenho dos concretos reciclados.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Tendo em vista os objetivos propostos, foi elaborado e desenvolvido um programa experimental, que estabelece variáveis de análise, materiais e métodos de experimentos. Teve-se como premissa o emprego racionalizado de recursos e cronograma de execução. O detalhamento do programa experimental é descrito na sequência.

#### **3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS**

O planejamento de experimentos engloba a definição das variáveis de controle, fixas e de resposta, os níveis de estudo da primeira, além do projeto estatístico rodado.

##### **3.1.1 Variáveis de resposta analisadas**

O programa experimental foi definido considerando o objetivo da pesquisa, que é verificar a influência dos agregados reciclados de concreto na produção de novos concretos frente à penetração de íons cloreto, resultando no estabelecimento das variáveis de resposta, conforme segue:

- Carga total passante, que retrata a resistência do concreto à penetração de cloretos de forma acelerada (Coulombs);
- Absorção total de água ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );
- Absorção de íons cloreto ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );
- Resistência à compressão aos 28 dias (MPa);
- Resistência à tração aos 28 dias. (MPa).

##### **3.1.2 Variáveis de Controle**

A partir das variáveis de respostas que se pretende mensurar, foram determinados os parâmetros decisivos no processo, ou seja, as variáveis controláveis ou independentes e os seus níveis fixos, cuja hipótese é de que apresentem influência sobre as variáveis de resposta. Desta forma, as variáveis ou fatores controláveis, e os níveis estudados nesta pesquisa, são apresentados, conforme segue:

- Teor de substituição de agregado natural pelo ARC, com níveis fixos em 0%, 25%, 50%, 75%, 100%;

- Resistência à compressão dos agregados, a fim de se testar a influência da porosidade do agregado reciclado, com níveis fixos em 18, 37 e 50 MPa, obtidos a partir de misturas com relação água/cimento de 0,85, 0,56 e 0,43;
- Teor de pré-molhagem ARC, definidos através do percentual total de absorção dos mesmos, com níveis fixos em 0, 25, 50, 75 e 100%.

Além destas variáveis, ao desenvolver o programa experimental, em função do ajuste de água para manutenção do abatimento de tronco de cone fixo, explicado no item 3.2.5.4, teve-se como consequência a inclusão nas análises estatística da variável de controle *a/c final*, com níveis aleatórios.

No entanto, é preciso salientar que algumas variáveis de controle foram estabelecidas em um único nível, sendo desta forma, denominados fatores de controle fixos, sendo eles:

- Tipo de cimento: CPV ARI;
- Idade de cura: 63 dias para a penetração de cloretos e 28 dias para resistência à compressão, como foi usado o CPV, este chega a sua resistência máxima aos 28 dias e é uma data padrão utilizada;
- Resistência à compressão da nova matriz de concreto onde serão inseridos os ARC com nível de fixo de um fck de 25 MPa do concreto novo.

### 3.1.3 Projeto Estatístico

Dal Molin et. al (2005) demonstraram que o planejamento estatístico de experimentos permite realizar análises mais refinadas dos dados, podendo ser utilizada a modelagem das variáveis de resposta por meio de curvas de regressão. É possível aplicar o projeto fracionado para racionalizar um programa experimental, o que possibilita trabalhar com diversas variáveis de controle, em diversos níveis, sem que o experimento se torne duvidoso, reduzindo assim o tempo de execução dos experimentos e o número de corpos-de-prova (amostras). Pode-se dizer que, quanto maior for o número disponível de informações para que se possa estabelecer um projeto experimental, maior será a otimização da obtenção de dados confiáveis.

A adoção de projeto fatorial fracionado possibilitou uma redução do número de corpos-de-prova de 900, para 384 e destes 96 foram usados especificamente para a penetração

acelerada de cloretos. A Figura 15 apresenta as combinações de variáveis da matriz do experimento fracionado.

		PM				
		0%	25%	50%	75%	100%
ARC 18 MPa	RCD					
	25%		●		●	
	50%	●		●		●
	75%		●		●	
	100%	●		●		●

		PM				
		0%	25%	50%	75%	100%
ARC 37 MPa	RCD					
	25%	●		●		●
	50%		●		●	
	75%	●		●		●
	100%		●		●	

		PM				
		0%	25%	50%	75%	100%
ARC 50 MPa	RCD					
	25%		●		●	
	50%	●		●		●
	75%		●		●	
	100%	●		●		●

Figura 15 - Matriz de variáveis experimental e ordem de execução dos traços.

## 3.2 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais empregados na produção do ARC e na produção da nova matriz de concreto. Os materiais foram selecionados conforme disponibilidade na região metropolitana de Porto Alegre.

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado no programa experimental foi o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, por proporcionar um rápido grau de hidratação das amostras e por não conter adições pozolânicas. Os cimentos foram obtidos de um único lote de produção. Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades fornecidas pelo fabricante.

**Tabela 7 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP-V-ARI.**

<b>Propriedades químicas do CP V-ARI</b>		
<b>Composição química do cimento</b>		<b>Resultados (%)</b>
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		18,67
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,07
Óxido de cálcio (CaO)		59,90
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,56
Óxido de magnésio (MgO)		5,31
Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		3,02
Perda ao fogo		3,32
CaO Livre		1,70
Resíduos insolúveis		0,64
Equivalente alcalino		0,63
<b>Propriedades físicas e mecânicas do CP-V-ARI</b>		
Expansibilidade a quente (mm)		0,85
Tempo de pega (min)	Início	02: 22
	Fim	03: 04
Consistência Normal		28,05
Blaine		4, 347
Retido na # 200		0,16
Retido na # 325		1,91
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,12
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	20,5
	3 dias	33,8
	7 dias	40,5
	28 dias	48,6

### 3.2.2 Agregado miúdo natural

No programa experimental utilizou-se areia de origem quartzosa, proveniente da região de Quatro Colônias, Rio Grande do Sul. Todo o material foi previamente seco em estufa a 100°C por 7 dias. Na Tabela 8 são apresentadas as características físicas do agregado miúdo.

Os ensaios de massa específica e massa unitária seguiram respectivamente as normas ANM NM 52:2002 e ANM NM 45:1995–Método “C”. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, o agregado miúdo é classificado comercialmente enquadrando-se dentro dos limites e com a faixa de distribuição granulométrica ótimo sendo este apropriado para a utilização em concretos, conforme a NM 248 (ANM, 2003), conforme mostrado na Figura 16.

Tabela 8 - Características do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	% retido	% retido acumulado
4,8	3	3
2,4	11	14
1,2	18	32
0,6	18	50
0,3	27	77
0,15	20	97
0,075	3	100
< 0,15	0	100
Módulo de finura	2,73	
Dimensão máx. Caract. (mm)	4,8	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,49	
Massa unitária (g/ cm <sup>3</sup> )	1,61	

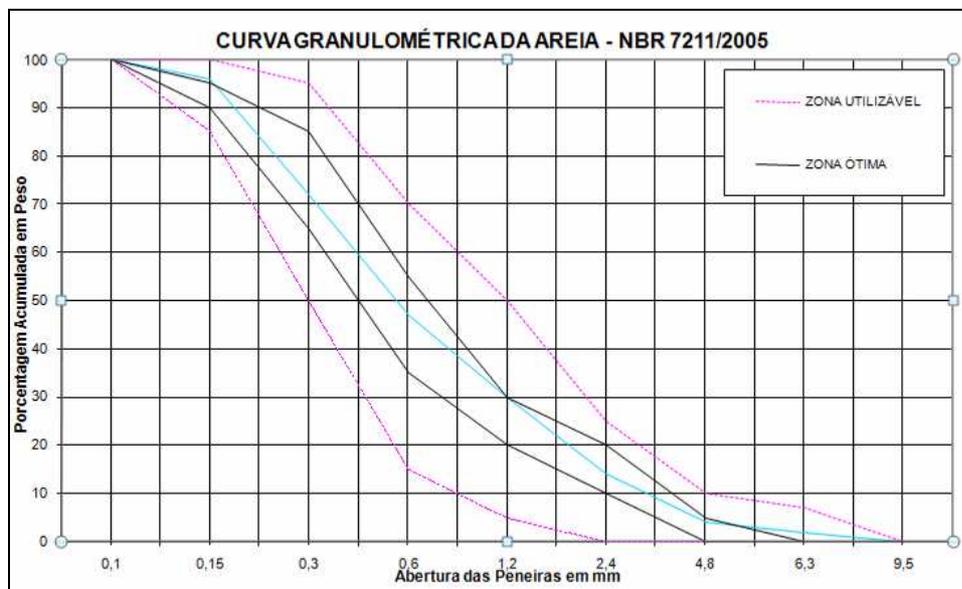


Figura 16 - Curva da distribuição granulométrica da areia.

### 3.2.3 Agregado graúdo natural

Como agregado graúdo utilizou-se brita de origem basáltica cujas características são apresentadas na Tabela 9. Este agregado foi previamente lavado para a retirada de impurezas e finos aderidos ao material, e colocado para secar ao ar.

De acordo com os resultados dos ensaios realizados, o agregado graúdo é classificado na faixa granulométrica compreendida entre 12,5 e 25 mm, definida dentro dos padrões da ABNT NM 248/ 2003.

Tabela 9 - Características do agregado graúdo.

Abertura de peneira (mm)	% média retida	% média acumulada
25	0	
19	2	2
12,5	60	62
9,50	32	94
6,3	6	100
4,80	0	100
< 4,8	0	100
Dimensão máxima (característica)	19	
Módulo de finura	6,96	
Massa específica ( g/ cm <sup>3</sup> )	2,75	
Massa unitária (g / cm <sup>3</sup> )	1,49	

### 3.2.4 Água

Foi utilizada para execução do concreto, água proveniente da rede pública de abastecimento.

### 3.2.5 Agregado graúdo reciclado de concreto

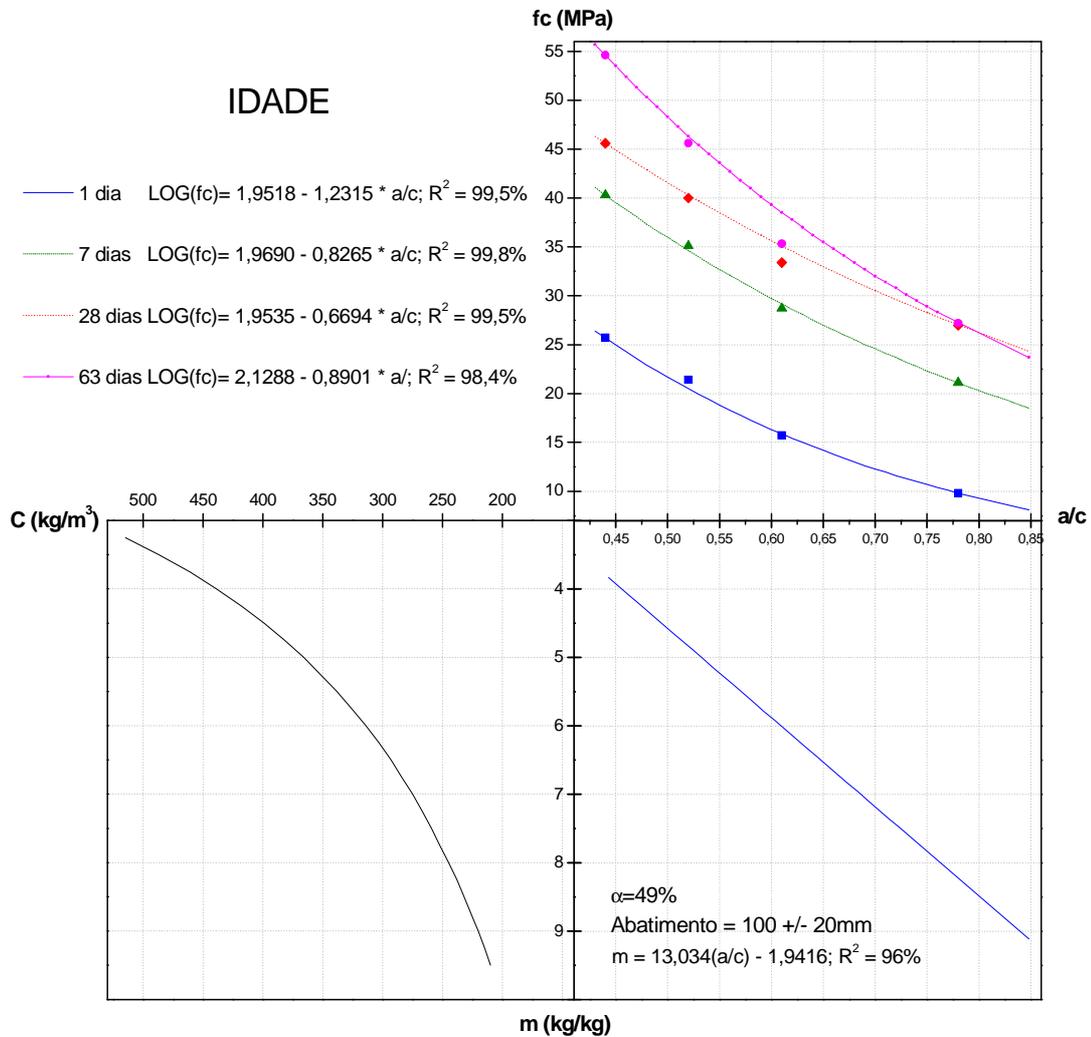
Os concretos empregados como ARC na pesquisa foram produzidos em laboratório a fim de se ter controle de suas propriedades. Para a confecção destes concretos, foram utilizados os mesmos materiais do concreto da nova matriz onde foram inseridos os ARC. O método de dosagem também permaneceu o mesmo, que é descrito no item 3.2.5.1. O processo de produção ocorreu executando-se oito misturas para cada relação a/c, onde foram estabelecidas resistências equivalentes aos concretos pobre, intermediário e rico em consumo de cimento.

#### 3.2.5.1 Dosagem dos concretos dos agregados reciclados (ARC)

Para a dosagem dos concretos que foram empregados como ARC, foi adotado o método de Helene e Terzian (1992), que consiste no ajuste de um teor ótimo de argamassa  $\alpha$  (%), para um traço intermediário coma um valor de abatimento pré-fixado, neste caso de  $100 \pm 20$  cm. A quantidade de água foi ajustada em função deste abatimento estabelecido. Em seguida foram determinados mais três traços, dois mais pobres e outro mais rico em consumo de cimento, relativamente ao primeiro traço ajustado. O teor de argamassa para este concreto foi ajustado em  $\alpha=49\%$ .

Após a determinação do teor de argamassa e dos demais traços, os mesmos foram ensaiados à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias. Com os resultados, foram

ajustadas as equações matemáticas para a curva de Abrams para cada uma das idades, bem como a curva da Lei de Molinary e a reta da Lei de Lyse, para o cimento CP V ARI e agregados escolhidos, compondo um diagrama de dosagem, conforme apresentado na Figura 17.



**Figura 17 - Diagrama de Dosagem do Concreto.**

Os corpos-de-prova foram moldados com dimensões de 15 x 30 cm e 10 x 20 cm. Permaneceram nos moldes à temperatura e umidade ambiente por 24 horas, com o topo protegido por placas de vidro. Foram desmoldados e levados para cura em câmara úmida. Nas idades especificadas testou-se a resistência mecânica destes concretos para caracterizá-los. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração aos 28 dias são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Resistências dos ARC para incorporação na nova matriz.**

<b>Relação a/c</b>	<b>Resistência à compressão<sup>1</sup> 28 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à tração por compressão<sup>2</sup> diametral -28 dias (MPa)</b>
0,85	18	7
0,56	37	11
0,43	50	14

<sup>1</sup> ANM NM 101:1996; <sup>2</sup> ANM NM 8:1994

Foram ensaiados oito corpos-de-prova por traço, sendo cinco para compressão axial e três para tração por compressão diametral. Os demais corpos-de-prova permaneceram em cura úmida até os 63 dias de idade, quando foram submetidos ao processo de cominuição por britagem. Após a cominuição, os agregados de concreto foram armazenados em estufa a 60°C, por um período de sete dias, garantindo a secagem total dos mesmos.

Logo após o período de estufa, os ARC passaram pelo processo de peneiramento em agitador de peneiras, durante 15 min. Este processo foi importante para se definir o tamanho da fração graúda para a confecção dos novos concretos. Deste modo, o material empregado no estudo foi o passante na peneira com abertura de 25 mm e retido na abertura 4,8mm, garantindo a mesma dimensão máxima característica que a do agregado graúdo natural empregado como referência.

O material resultante do peneiramento foi armazenado de forma a garantir sua total proteção contra qualquer tipo de contaminação e umidificação. O montante de material gerado foi em torno de 2.000 Kg. Esta produção foi previamente calculada para suprir a demanda global do projeto, no qual este projeto de dissertação está inserido, considerando os percentuais de substituição em massa com compensação de volume do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto.

Para se inserir este resíduo em uma nova matriz de concreto, foi preciso fazer a caracterização destes agregados. Os resultados da caracterização estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Caracterização física dos agregados provenientes da britagem dos concretos.**

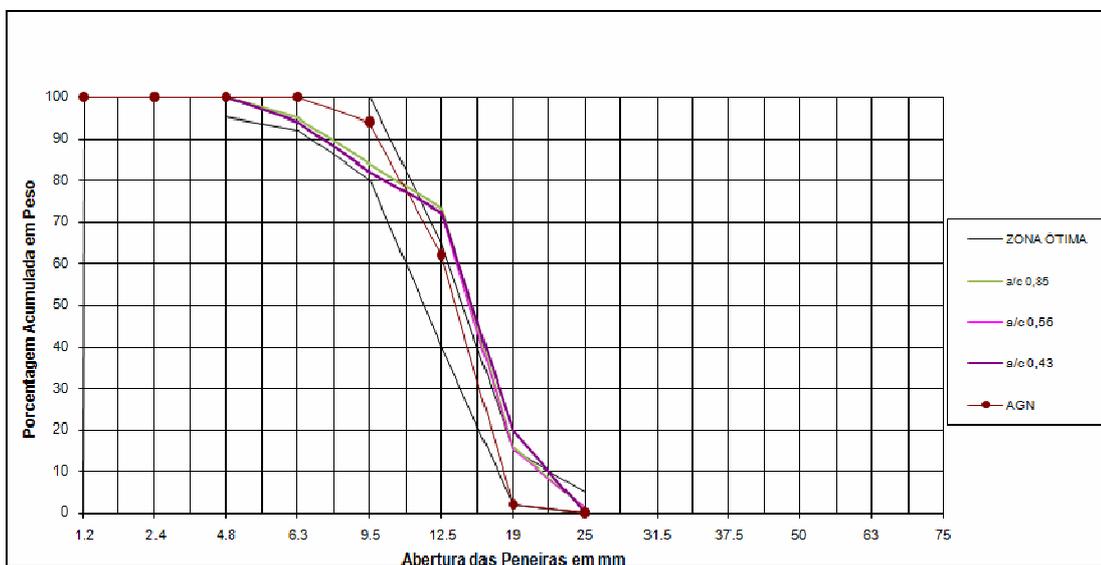
<b>Agregado (relação a/c)</b>	<b>Dimensão máxima característica</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)<sup>1</sup></b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)<sup>2</sup></b>
0,85	25	7,68	2,50	1,21
0,56	25	7,61	2,47	1,18
0,43	25	7,70	2,49	1,21

<sup>1</sup> ANM NM 52:2002; ANM NM 53:2002; <sup>2</sup> ANM NM 45:1995

Observando-se os resultados do ensaio de granulometria do ARC, pode-se constatar que a britagem gera uma fração fina correspondente a valores em torno de 16% da massa total

de agregado, independente do tipo de concreto. Isto pode estar relacionado com o tipo de britagem e peneiramento empregados. Os resultados de caracterização granulométrica apontam uma distribuição homogênea entre as diferentes aberturas de peneira para as amostras ensaiadas.

Os resultados do ensaio de granulometria apresentado nas curvas da Figura 18, indicam que o material é apropriado para ser usado na produção de concreto, observa-se que o mesmo está inserido dentro da zona de distribuição entre as dimensões 12,5mm a 25 mm. As médias adotadas dos percentuais retidos são referentes aos ensaios obtidos de duas amostras para cada tipo de agregado.



**Figura 18 - Curvas granulométricas para os agregados - NM 248/2003**

### 3.2.5.2 Absorção dos Agregados graúdos reciclados de concreto

Para a determinação da absorção de água dos agregados, foram adotados os métodos de absorção de água por imersão, adaptado de Leite (2001), e absorção de água por capilaridade conforme método do RILEM TC 116 PCD (1999).

A decisão de se trabalhar com estes dois métodos surgiu em função do comportamento do ARC apresentado nos ensaios pilotos, onde se realizou a pré-molhagem, bem como na etapa do ensaio de abatimento de tronco de cone. Com os dois resultados dos métodos citados foi possível avaliar as eventuais diferenças e assim entender melhor o comportamento dos agregados reciclados frente à absorção de água. Uma ampla discussão sobre a comparação destes dois métodos é realizada em Werle et al. (2010).

### a) Absorção de Água por Imersão

As amostras de agregados foram secas em estufa até constância de massa (variação de  $\pm 0,1\text{g}$ ), resfriadas e mantidas em dessecadores contendo sílica gel, antes de serem submetidas ao ensaio de absorção.

O ensaio de absorção é dividido em duas etapas:

Etapa 1- Registro de absorção no primeiro minuto: A amostra seca e previamente pesada é colocada dentro de um recipiente vazado e submersa em água; ao alcançar 1 minuto o material é retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e a nova massa é determinada;

Etapa 2 – Registro da absorção ao longo do tempo: Uma amostra seca de agregados é colocada em um recipiente vazado, acoplado a uma balança hidrostática, e o conjunto é submerso em água; são registrados os valores de acréscimo de massa, com o auxílio de balança hidrostática, nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos; 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48 e 72 horas; a amostra permanece submersa ininterruptamente durante as 72 horas do ensaio (ou até a constância de massa). Os resultados obtidos a partir do ensaio de absorção por imersão são apresentados na figura 2, adotando-se o acréscimo de massa determinado conforme descrito na etapa 1 para o primeiro minuto.

Os resultados dos ensaios de absorção de água ao longo do tempo pelos agregados reciclados estão apresentados na Figura 19.

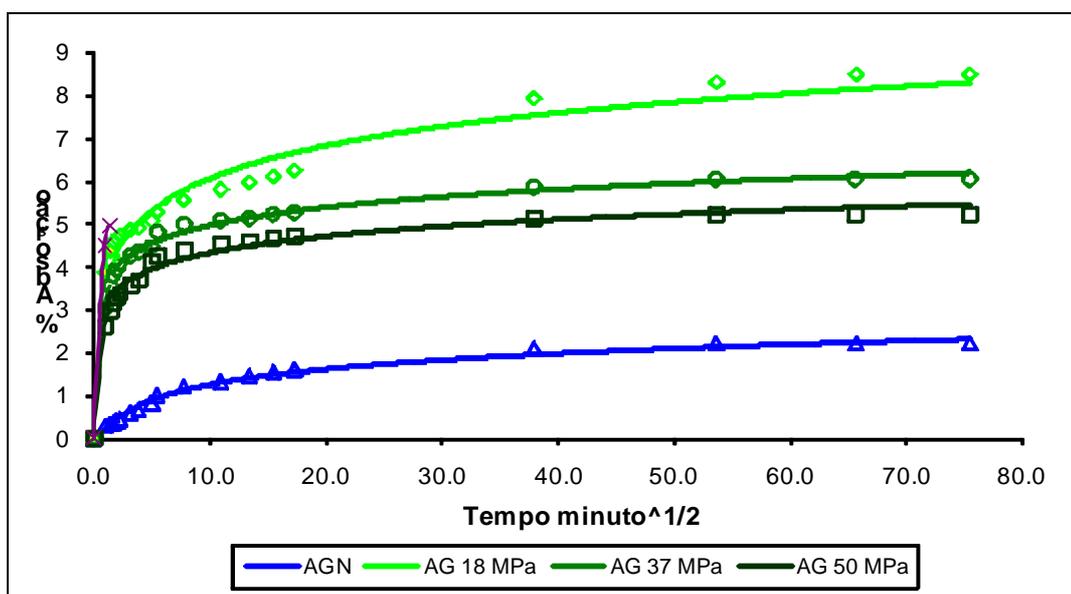


Figura 19 - Absorção de água ao longo do tempo do ARC.

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 19 deixam clara a grande diferença entre a absorção do agregado natural para os agregados reciclados. Os agregados convencionais não exercem muita influência sobre a taxa de absorção referente à mistura de concreto, pois estes apresentam pouca ou quase nenhuma porosidade. Quando é usado o agregado reciclado para a produção de concretos, a influência da absorção do agregado torna-se de grande importância, pois estes valores apresentam-se bem mais altos do que os agregados convencionais normalmente utilizados, sendo de extrema importância uma umidificação anterior, para que o ARC não interfira na água da mistura do concreto.

Leite (2001) verificou que tanto o agregado miúdo reciclado, quanto o graúdo, absorveram mais de 50 % da massa total de água antes dos primeiros 30 minutos, constatando que a absorção é mais rápida quanto menor for à dimensão da partícula do agregado.

Observou-se, também, que o percentual de absorção, para as frações, não variou muito do intervalo dos 10 para os 30 minutos de ensaio. Com base nos resultados do ensaio de absorção do ARC foram estabelecidas algumas diretrizes para compensação da absorção de água do material para execução dos traços de concreto com agregado reciclado. A pré-molhagem foi estipulada de acordo com o percentual total de absorção equivalente para cada tipo de ARC. Foi estabelecido que os agregados reciclados teriam suas taxas de absorção compensadas e que o material seria pré-molhado nos 10 minutos antecedentes ao início da mistura dos materiais na betoneira para a produção do novo concreto.

A elevada absorção de argamassa aderida nas partículas dos agregados é a responsável pela alta taxa de absorção dos agregados reciclados, explicando assim a maior porosidade e diminuição da massa específica dos agregados reciclados quando comparados com os agregados naturais (BUTTLER, 2003).

No presente programa experimental foi adotado o método de absorção por imersão para caracterizar o ARC. Contudo, o comportamento observado dos ARC submetidos a pré-molhagem levou a uma investigação posterior da absorção por capilaridade, conforme descrito no próximo item (WERLE et al., 2010).

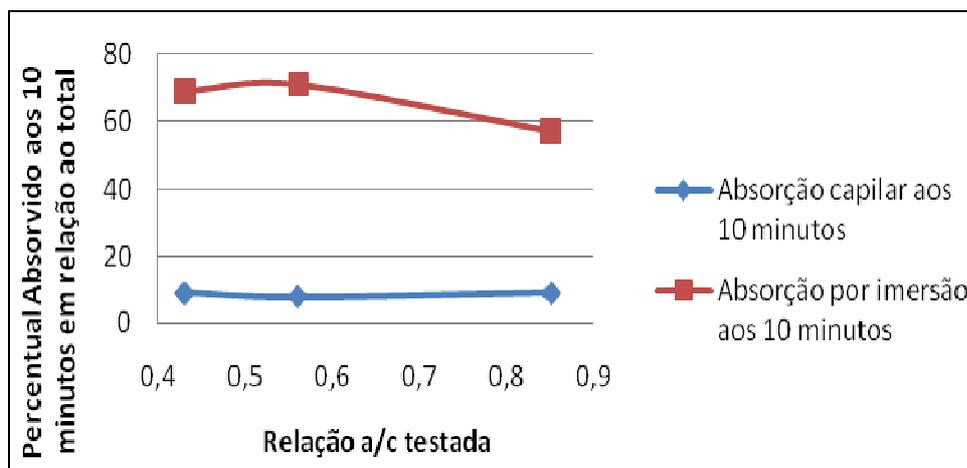
## **b) Absorção de Água por Capilaridade**

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a RILEM TC 116 PCD, alterando-se os tempos de medição de modo a permitir a comparação entre os dois

métodos utilizados no programa experimental. A execução deste método é descrita na sequência:

Após 28 dias de cura submersa dos concretos, um corpo-de-prova 10x20cm foi serrado em 5 partes, sendo três partes, com altura de 5cm, retiradas da parte central da peça, desprezando as partes superior e inferior do corpo-de-prova. As três amostras de 10x5cm foram mantidas em estufa a 60°C até a estabilização de massa. Estas amostras, após saírem da estufa, permaneceram em dessecador com sílica gel até atingirem a temperatura ambiente, em sala com temperatura controlada (20°C±1°C). Assim que retiradas do dessecador, as laterais das amostras foram seladas com fita adesiva extra-forte, de forma a impermeabilizar esta face. As superfícies, superior e inferior, foram deixadas livres. Um balão de látex foi colocado na superfície superior, para que não haja uma interferência da umidade externa na face superior da amostra. A maleabilidade do látex propicia espaço para o ar expulso pela absorção de água. A superfície inferior permaneceu em contato com uma lâmina de água, com profundidade de 3 mm.

A absorção de água por capilaridade foi acompanhada através da pesagem das amostras nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas (mesmos intervalos de tempo adotados para o ensaio de absorção por imersão dos agregados). Para o registro do peso, as amostras são retiradas da água e secas superficialmente com pano úmido (para remover o excesso de água), de modo que a superfície permaneça úmida. A comparação entre os dois métodos é apresentada no gráfico da Figura 20.



**Figura 20 - Comparação entre os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade, nos 10 minutos iniciais do ensaio.**

Fonte: Werle et. Al, 2010

A comparação entre os dois gráficos demonstra que a absorção do agregado imerso em água é brusca, ocorrendo em sua maioria no primeiro minuto de contato com a água, enquanto que a absorção por capilaridade ocorre de forma mais lenta e gradual. Considerando-se a quantidade de água absorvida, há uma diferença na ordem de 60% da absorção total do agregado entre os dois. Partindo-se da hipótese de que o comportamento real da absorção de água de um agregado imerso em argamassa é mais próximo da capilaridade do que da imersão, verifica-se que a estimativa da absorção de água por imersão pode levar a sérias distorções na determinação da quantidade de água que deve ser utilizada na pré-molhagem do agregado reciclado, uma vez que a absorção de água do agregado no concreto fresco irá ocorrer em velocidade substancialmente inferior àquela obtida pelo ensaio de absorção por imersão.

A estimativa do teor de água a ser utilizado na pré-molhagem, segundo o exposto, não deve se basear na absorção determinada por imersão, mas sim por capilaridade, uma vez que o ensaio de imersão tende a superestimar a quantidade de água que será absorvida da argamassa pelo agregado ao longo dos primeiros minutos de contato com a água.

### 3.2.5.3 Determinação da água de pré-molhagem

Através dos resultados dos ensaios de absorção por imersão dos agregados reciclados, foram obtidos os valores de quanto eles absorviam de água ao longo do tempo. Desta forma, foi feita uma relação entre o valor total relativo de água absorvida dos agregados (%) com a massa total dos ARC, resultando assim nas quantidades de água de pré- molhagem para cada mistura (Equação 6).

$$APM=(ABS\_AG \times TPM)/100 \times MAG \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

APM = água total de pré-molhagem (g)

ABS\_AG = absorção total dos agregados reciclados (%)

TPM = teor de pré-molhagem (%)

MAG = massa de agregado reciclado (g)

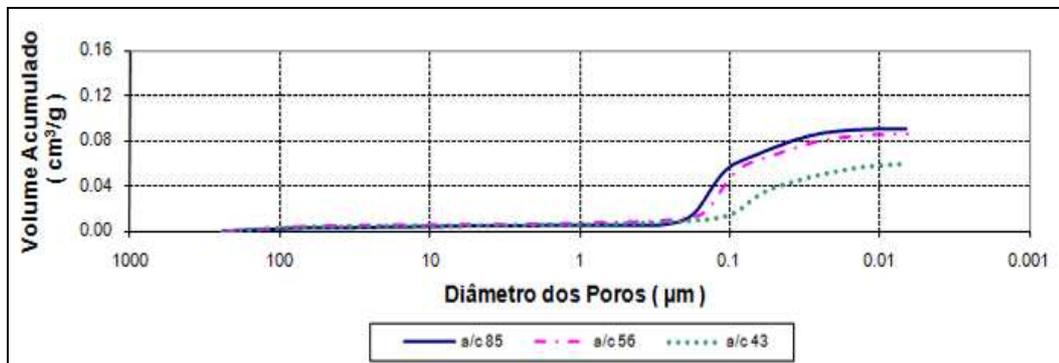
### 3.2.5.4 Água de ajuste do abatimento de tronco de cone

Pelo fato deste trabalho estar inserido dentro de um projeto maior, as decisões tomadas no programa experimental de Grub (2010) influenciaram os demais programas experimentais

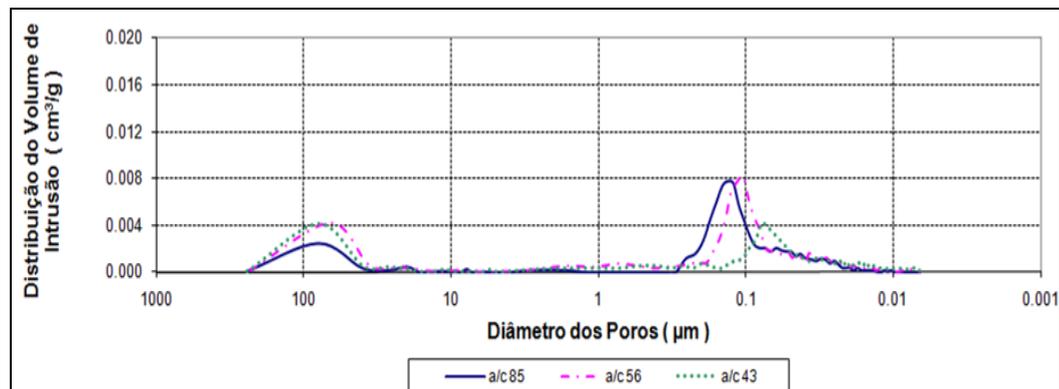
do projeto. As propriedades do concreto fresco precisavam ser garantidas e definiu-se um abatimento fixo de  $100 \pm 20$  mm. Entretanto foi necessário fazer um ajuste de abatimento de tronco de cone, o que gerou uma matriz de concreto com o a/c modificado, para cada traço. O resultado foi uma nova variável independente que foi tratada por a/c final (a/c inicial + ajuste de slump), com níveis aleatórios.

### 3.2.6 Porosimetria dos agregados reciclados de concreto

O objetivo deste ensaio foi determinar a quantidade, o tamanho e a distribuição dos poros existentes nos agregados reciclados. Esta caracterização é apresentada na Figura 21 e na Figura 22.



**Figura 21 - Porosimetria ARC- Volume acumulado de poros no concreto**



**Figura 22 - Porosimetria do ARC – Distribuição do volume de poros no concreto reciclado**

Observa-se nos gráficos da Figura 21 que a quantidade total de poros é diretamente proporcional à relação água/ cimento do concreto e, desta forma, inversamente proporcional à resistência. Na análise da Figura 22, percebe-se que há uma redução significativa no volume de poros distribuídos na faixa entre 0,5 a 0,01  $\mu\text{m}$  para a relação a/c 0,43 em comparação com os demais traços.

### 3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E CORPOS-DE-PROVA

As concretagens seguiram uma ordem aleatória. Para a execução dos concretos, foi utilizada uma betoneira de eixo vertical. O concreto empregado como referência, e no qual foram realizadas as substituições parciais e totais de agregado natural por ARC, não seguiu o mesmo traço do concreto empregado para o ARC. Após algumas misturas pilotos, verificou-se que ao empregar ARC, o teor de argamassa de 49% não seria mais o ideal, dificultando os ajustes necessários para obter-se a trabalhabilidade pré-estabelecida de  $100 \pm 20$  mm. Desta forma, chegou-se a um ajuste de teor de argamassa de 53%, resultando em um traço de 1:3,13:3,67, com relação a/c de 0,64, com resistência estimada para um fck de 25 MPa.

Para a produção dos concretos, segue-se um padrão na ordem de mistura. Colocou-se em primeiro lugar a brita, tanto natural como os percentuais de ARC, metade da água, o cimento, a água restante juntamente com a areia.

A alta absorção dos agregados reciclados foi compensada fazendo-se uma pré-molhagem dos agregados antes dos mesmos serem utilizados na concretagem. O processo aconteceu cerca de dez minutos antes da mistura dos materiais para a concretagem, e o percentual variou de acordo com a taxa de absorção total de cada agregado reciclado. Também se efetuou um ajuste de água de amassamento para atender o abatimento de tronco de cone, conforme item 3.2.5.4.

Os corpos-de-prova de concreto foram moldados conforme recomendações da ABNT NBR 5738:2003, com adensamento manual, em duas camadas de 12 golpes cada. Foram moldados corpos-de-prova de todas as misturas para os ensaios, dos métodos a serem empregados neste estudo.

Para cada traço de concreto produzido foram moldados 12 corpos-de-prova, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo três utilizados para os ensaios de resistência à compressão, três para o ensaio de tração por compressão diametral, três para absorção por capilaridade e três para os ensaios dos métodos de penetração de cloretos.

Após concretagem, os corpos-de-prova foram cobertos com vidro, para evitar perda de água pela superfície externa por 24 horas. Decorrido este período os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em cura submersa em tanques de água e cal na câmara úmida por um período suficiente para se ter uma hidratação máxima e permanecendo neste local até a data da realização dos devidos ensaios.

### 3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

A seguir serão apresentados os métodos de ensaio utilizados para cada variável de resposta estudada na pesquisa.

#### 3.4.1 Resistência à compressão e à tração

Os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral foram executados conforme ABNT NBR 5739:2003. O ensaio foi realizado em corpos-de-prova com dimensões de 10 cm x 20 cm, na idade de 28 dias. Os corpos-de-prova tiveram capeamento com enxofre, para que a superfície fosse regularizada. Foram ensaiados três corpos-de-prova para resistência à compressão axial e três para a resistência à tração por compressão diametral.

#### 3.4.2 Absorção de água por capilaridade

Para absorção de água por capilaridade foi adotado o método RILEM TC166- PCD, descrito no item 3.2.5.2. A amostra com dimensões de 100 mm de diâmetro por 50 mm de espessura ficou em contato com água, e periodicamente foi registrado o aumento de massa pela absorção capilar, através da pesagem das amostras. A vedação, (cobertura plástica) permitiu um fluxo unidirecional ocasionado pela rede de poros, ocorrendo saída de ar presente nos poros até o ponto flexível que a cobertura plástica proporciona, à medida que a água foi absorvida, conforme ilustrado na Figura 23.

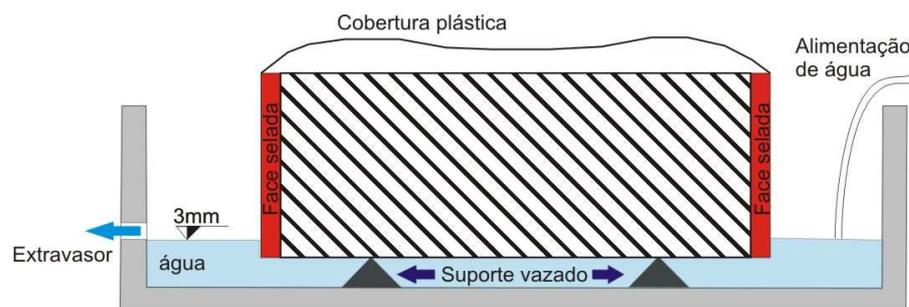


Figura 23 - Sistema experimental do método de absorção capilar (RILEM, 1999)

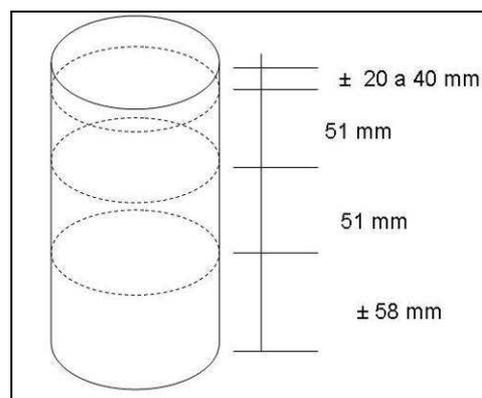
#### 3.4.3 Penetração acelerada de íons cloreto

O ensaio utilizado na pesquisa foi o ensaio baseado na ASTM C1202-07 - Rapid Chloride Ions Penetration Test- RCPT (ASTM, 2007) por se tratar de um teste normatizado e muito utilizado no meio científico e por ser considerado um método rápido (KULAKOWSKI, 1994; HOFFMANN, 2001; SIQUEIRA, 2008).

Neste trabalho o método especificado pela ASTM C1202-07, que consistiu em dispor um corpo-de-prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 51 mm de espessura, entre duas meia-células de acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com uma concentração à 0,3N (em água deionizada ou destilada), e outra com solução de cloreto de sódio (NaCl), a 3% (em água deionizada ou destilada) de concentração (em massa de cimento). Entre estas meias – célula foi aplicada uma diferença de potencial de  $60 \pm 0,1V$ , gerando uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através da amostra de concreto decorrente da ação de um campo elétrico. O ensaio teve duração de seis horas e a leitura da corrente passante foi registrada por amperímetro, realizada em intervalos de trinta minutos. O produto da corrente pelo tempo foi expresso em coloumbs, o qual indicou a carga total que atravessou o corpo-de-prova e indicou a maior ou menor resistência do concreto à penetração de íon cloreto.

Para o desenvolvimento deste método, a pesquisa contou com oito células, que foram dispostas paralelamente de modo que fossem submetidas à mesma tensão de  $60 \pm 0,1V$ .

Os corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) foram retirados do ambiente de cura o qual se encontravam e serrados em quatro partes perpendiculares ao eixo. As amostras de concreto específicas para este ensaio foram retiradas da parte central de corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, conforme a Figura 24.



**Figura 24 - Corte das amostras.**

As amostras, depois de cortadas, foram submetidas em um período médio de cinco dias em estufa à temperatura de  $60^{\circ}C$ . Quando a massa estabilizou os corpos-de-prova foram colocados durante 24 h no dessecador para esfriar.

O procedimento seguinte para as amostras foi impermeabilizar e colocá-las de volta na sala de cura até completarem a idade de 63 dias. As amostras então foram retiradas um dia antes do ensaio em cura submersa e colocadas em dessecador, submersas em água deionizada

durante 1 hora, e depois secas com pano adsorvente. Na sequência foram coladas as meias-células com um adesivo de poliuretano. Nas meias-células se encontram os eletrodos, constituídos por anéis e tela metálica, com o qual o corpo-de-prova fica em contato, ocorrendo assim a diferença de potencial (Figura 25).



Figura 25 – Colagem dos corpos de prova às células de acrílico

Todos os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de  $21 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $70 \pm 5\%$ .

Na Figura 26 é apresentado o sistema de células, juntamente com a fonte elétrica que promove a diferença de potencial, com controle da tensão, e os amperímetros para registro das correntes passantes.



Figura 26 - Esquema da montagem do ensaio de penetração de cloretos

Com a finalização do ensaio (6h), é então calculada a carga total passante (**Equação 7**), verificando-se a classificação do concreto, quanto à resistência de penetração dos íons cloreto, de acordo com norma ASTM C1202-07 (Tabela 12).

$$Q = 900. (I0 + 2.I30 + 2.I60 + \dots + 2.I330 + I360)$$

Equação 7

Onde:

Q = carga total passante (Coulombs);

It = corrente medida nos tempos t (t em minutos, Àmperes).

**Tabela 12 - Ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C1202-07)**

Carga Total Passante (Coulombs)	Penetrabilidade dos íons cloreto
>4000	alta
2000 - 4000	moderada
1000-2000	baixa
100-1000	muito baixa
< 100	despresível

É importante salientar que esta classificação é feita apenas qualitativamente e serve para uma referência da penetração de cloretos.

#### 3.4.4 Ensaio de absorção de cloretos

Este método de ensaio foi baseado no RILEM TC166- PCD, conforme descrito no item 3.2.5.2. As amostras para o desenvolvimento deste ensaio tiveram um processo de cura igual às demais amostras dos outros ensaios. As faces foram seladas, sendo que a face inferior ficou em contato com uma solução de 3,0 % de NaCl, e a face superior foi vedada com um material flexível, pois há uma transmissão de vapor a partir da face molhada do concreto para o ambiente seco da face externa, por isso foi preciso vedar a face superior, para que o ar presente nos poros não evaporasse.

A absorção capilar é medida através da massa da amostra nos seguintes intervalos de tempo 10 minutos, 1,4 e 24 horas, mas foi feita adaptações no tempo das medidas, conforme o ensaio de absorção de água por capilaridade. A superfície inferior permaneceu em contato com a solução, na profundidade aproximada de três mm, sendo que o nível da solução precisa permanecer constante. Conforme exemplificado na Figura 27.



**Figura 27 - Ensaio de absorção de cloretos**

### **3.4.5 Análise estatística**

O tratamento estatístico dos resultados obtidos nos ensaios foi realizado aplicando-se a ferramenta de regressão múltipla, com o objetivo de correlacionar os resultados ensaiados por meio de modelagem matemática, resultando em curvas de comportamento. Desta forma, ao se obter curvas de comportamento dos materiais é possível prever o comportamento dos concretos com combinações de variáveis que não foram contempladas no projeto experimental. Também se empregou análise de variância (ANOVA) para algumas variáveis de resposta.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio executado, ou seja, para cada variável de resposta estudada, bem como as análises estatísticas empregadas no tratamento dos dados. Como ferramenta de análise estatística foi empregada análise de regressão múltipla linear, cujos resultados são apresentados na forma de modelos matemáticos, tabelas de análise de variância (ANOVA) dos modelos e gráficos das curvas dos modelos obtidos. É feita uma comparação entre os valores observados e os calculados pelos modelos, representando esta comparação na forma gráfica.

Cabe ressaltar que a variável de controle “tipo de agregado, estudada em três níveis, além do de referência, foi analisada considerando a absorção do agregado reciclado (ABS) ou então a resistência à compressão do agregado reciclado (FCAG).

### **4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Na sequência são apresentados os dados de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral. Os resultados são apresentados em forma de gráficos com as médias dos resultados obtidos para cada uma das variáveis independentes estudadas. A análise foi realizada por análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas (fatores), sendo apresentada na forma de tabelas e gráficos de médias.

#### **4.1.1 Resistência à compressão**

Na Tabela 13 são apresentadas as médias dos resultados obtidos nos ensaios para resistência à compressão (GRUB, 2010). A ANOVA para os dados de resistência à compressão é apresentada na Tabela 14 e a influência dos efeitos isolados de cada um dos fatores analisados sobre a resistência à compressão é apresentada nos gráficos de médias da Figura 28, Figura 29 e Figura 30. Ressalta-se que a variável “tipo de agregado” nestas análises foi representada pela resistência à compressão do ARC.

Tabela 13- Resultados das médias de resistência à compressão axial

Tipo de arc	Teor de substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18 MPa (a/c 0,85)	25%		33,3		27,2	
	50%	29,9		30,4		28,5
	75%		27,9		26,6	
	100%	26,8		25,5		25,6
37 MPa (a/c 0,56)	25%	29,5		35,4		32,7
	50%		31,6		33,7	
	75%	30,8		29,3		27,1
	100%		26,7		30,7	
50 MPa (a/c 0,43)	25%		32,7		25,8	
	50%	33,5		34,3		33,8
	75%		28,2		25,7	
	100%	31,1		32,6		28,8

O valor da resistência à compressão axial do concreto de referência é de 32,4 MPa.

Tabela 14- ANOVA dos efeitos dos fatores independentes sobre resistência à compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
FCAG	2	149,826	74,9128	8,30	0,0005
TAG	3	0,0596373	80,2656	8,90	0,0000
TPM	4	240,797	17,7291	1,97	0,1078
Erro	80	70,9162	9,02097		
Total Corrigido	89	1191,06			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; FCAG = resistência do ARC; TAG = teor de ARC; TPM = teor de pré-molhagem.

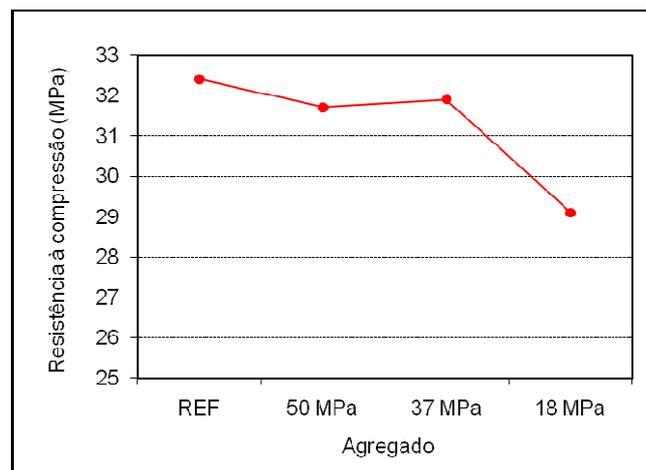
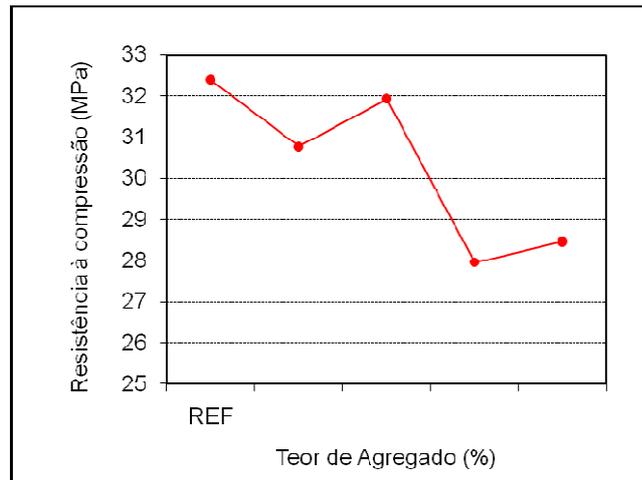
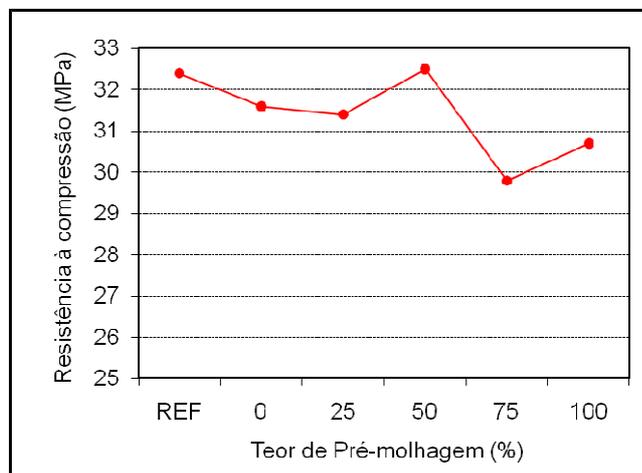


Figura 28 – Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial.



**Figura 29 – Efeito isolado da variável “teor de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial.**



**Figura 30 – Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento de resistência à compressão axial.**

A análise de variância para a propriedade resistência à compressão indica que, a um nível de significância de “p” de 0,01, tanto a variável “tipo de agregado” quanto o teor de substituição apresentam um efeito fortemente significativo no comportamento desta propriedade. Desta forma, quanto menor a resistência à compressão do ARC, menor a resistência à compressão dos novos concretos. Contudo, pela análise do gráfico da Figura 28, é possível inferir que a partir de certo limite de resistência do ARC, por volta de 30 a 35 MPa, ao aumentar a resistência do concreto reciclado inserido em uma nova matriz as diferenças das resistências à compressão dos novos concretos não apresentarão diferença significativa. Em um primeiro momento, pode-se dizer que a reciclagem de concretos de estruturas mais antigas, que eram produzidas com  $f_c$  na ordem de 15 a 18 MPa, deve ser considerada com

cautela e seu emprego em novos concretos deve ser acompanhado de uma caracterização criteriosa.

O efeito isolado do fator “teor de ARC”, apresentado na Figura 29, indica que até 50% de substituição de agregado natural por ARC as resistências à compressão dos novos concretos são similares à resistência à compressão do concreto de referência. Contudo, acima deste teor de ARC, as resistências dos novos concretos diminuem na ordem de 10% com o aumento de teor de ARC, em relação ao concreto de referência.

A variabilidade introduzida nos resultados devido ao fator “teor de pré-molhagem” pode ser verificada quando se analisa o gráfico da Figura 30, não havendo uma tendência de comportamento clara. Contudo, o valor de “p” para esta variável é de 0,1078, o que significa que a um nível de confiança de 90% “teor de pré-molhagem” apresenta um efeito pouco significativo sobre o comportamento da resistência à compressão. Considerando a variabilidade inerente ao agregado reciclado de concreto, o teor de pré-molhagem poderia ser considerado como uma influência na resistência à compressão.

Segundo Poon e Kou (2006), a resistência à compressão axial dos concretos contendo misturas com teores de substituição de 0 %, 20 %, 50 % e 100 % de ARC e com substituição parcial de cinza volante equivalente a 0 %, 25 % e 35 % em massa de cimento, demonstraram uma diminuição com o aumento do teor de ARC, nas idades de 28 dias, quando empregados em novos concretos com relação a/c de 0,55 e 0,45. Como já comentado, o mesmo comportamento não foi observado no presente estudo, sendo que a matriz empregada apresentava uma relação a/c inicial de 0,64. Contudo, tendo em vista o ajuste de abatimento de tronco cone, conforme já explicado no item 3.2.5.4, a relação a/c final para as diversas combinações de variáveis resultou em valores diferentes entre os diversos concretos. Em média, a relação a/c final dos concretos com 25 e 50% de teor de substituição ficou na ordem de 0,64 a 0,68, o que pode indicar que estes teores de substituição em matrizes mais porosas podem ser benéficos.

Um aspecto observado através dos resultados apresentados neste trabalho, relacionados à resistência à compressão axial, é que o emprego exclusivo de RCD de concreto na produção de novos concretos, permite o aumento do teor de substituição quando comparados aos concretos produzidos com RCD misto. Deste modo esta propriedade não sofreria influência até um teor de substituição de 50% de ARC, conforme os dados obtidos.

#### 4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 15 são apresentados os valores referentes à resistência à tração por compressão diametral, resultantes das diversas combinações das variáveis de controle.

**Tabela 15 - Médias dos resultados da resistência à tração por compressão diametral.**

Tipo de ARC	Teor de Substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18 MPa (a/c 0,85)						
	25%		11,5		10,3	
	50%	9,6		8,8		8,8
	75%		8,8		9,1	
	100%	8,5		7,3		6,8
37 MPa a/c 0,56						
	25%	8,7		10,7		10,0
	50%		10,8		10,1	
	75%	9,0		9,3		9,1
	100%		8,5		7,4	
50 MPa a/c 0,43						
	25%		10,0		8,8	
	50%	10,4		8,8		9,7
	75%		7,9		9,6	
	100%	8,3		8,5		9,4

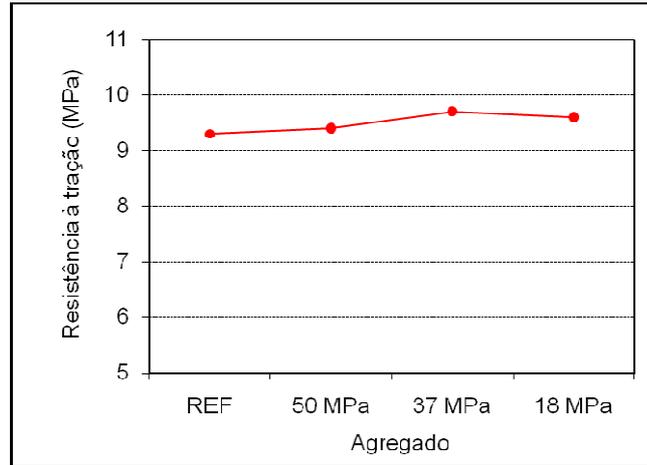
O valor da resistência à tração do concreto de referência é de 10,36 MPa.

A ANOVA para os dados de resistência à tração é apresentada na Tabela 16 e a influência dos efeitos isolados de cada um dos fatores analisados sobre a resistência à tração é apresentada nos gráficos de médias da Figura 31, da Figura 32 e da Figura 33. Ressalta-se que a variável “tipo de agregado” nestas análises foi representada pela resistência à compressão do ARC.

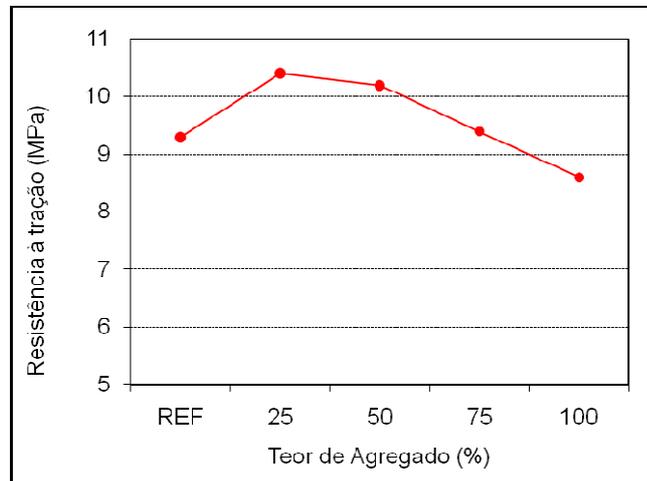
**Tabela 16- ANOVA dos efeitos dos fatores independentes sobre resistência à tração.**

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
FCAG	2	1,6849	0,842449	0,60	0,5523
TAG	3	45,1972	15,0657	10,70	0,0000
TPM	4	2,75245	0,688113	0,49	0,7441
Erro	80	112,669	1,40836		
Total Corrigido	89	166,164			

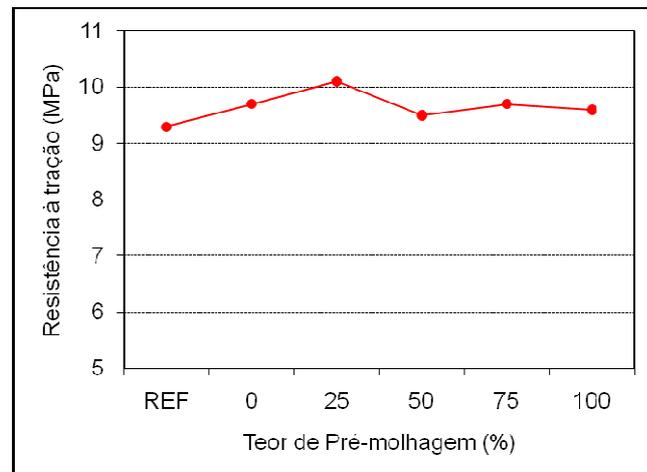
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; FCAG = resistência do ARC; TAG = teor de ARC; TPM = teor de pré-molhagem.



**Figura 31 – Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral**



**Figura 32 – Efeito isolado da variável “teor de substituição” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral**



**Figura 33 – Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento de resistência à tração por compressão diametral**

A análise de variância para a propriedade resistência à tração indica que, o valor de “p” de 0,01, representa um nível de significância de 99% para a variável “teor de substituição”, sendo que este fator representa ter um efeito fortemente significativo nesta propriedade. Entretanto, a análise estatística dos fatores “tipo de agregado”, representado pela resistência à compressão do agregado, e “teor de pré-molhagem retornou um valor de “p” de 0,5523 e 0,7441, respectivamente. Estes valores indicam que estas variáveis de controle exercem uma influência muito fraca no comportamento da propriedade em questão, o que pode ser observado nos gráficos das Figura 31 e Figura 33. Nestes gráficos observa-se que a variação média da resistência à tração entre os níveis de tipo de ARC é de 3% e entre os níveis de teor de pré-molhagem é de 5%. Por sua vez, a variação da resistência à tração média para a variável significativa teor de ARC é de 18%,

Lovato (2007), trabalhando com agregado reciclado misto, relatou em sua pesquisa, que todos os traços contendo agregados reciclados tiveram uma diminuição na resistência à tração por compressão diametral, quando comparados com os concretos de referência. A redução foi semelhante para as matrizes de diferentes relações a/c, quando comparada com as mesmas combinações, variando de 9 a 41% dependendo o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Entretanto, ficou evidente nos resultados que esta redução foi menor para os traços que continham relações a/c mais altas. Se forem analisadas as relações a/c finais dos novos concretos, pode-se afirmar que esta mesma tendência é observada no presente trabalho.

Conforme Nunes (2007), à medida que a quantidade de AGR (agregado graúdo reciclado) misto aumenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral diminuem nas três matrizes de concreto novo estudadas, compostas com a/c 0,85, 0,64 e 0,48. Os concretos de referência apresentaram um valor médio de 2,51 MPa. No entanto os concretos com 100% de AGR esta média atingiu valor de 1,53 MPa, ou seja, cerca de 61% do valor médio relativo aos concretos de referência. Os concretos com 25% de teor de substituição do AGN por AGR atingiram aproximadamente 85% do valor médio dos concretos de referência. Na pesquisa desta dissertação ocorreu um aumento de 7% em relação ao concreto de referência quando se empregou 25% de ARC, 4% ao empregar-se 50% de ARC e uma diminuição de 4% e 13% para 75% e 100% de ARC respectivamente. Estes dados indicam que, ao comparar com os autores citados, o emprego de agregado reciclado oriundo somente de concreto apresenta vantagens sobre aqueles que empregam agregado reciclado misto, o que já era esperado.

Tendo em vista as análises realizadas para resistência à compressão e à tração, poder-se-ia afirmar que, em termos práticos, para o emprego do ARC, este deve ser separado em apenas duas categorias, alta e baixa resistência, tomando-se como um ponto de divisão um valor em torno de 30 MPa. Por sua vez, acredita-se que para empregar o ARC na produção de concretos comerciais pode-se eliminar a pré-molhagem. Sob ponto de vista da resistência à compressão a pré-molhagem pode ser descartada, pois é uma tarefa a mais a ser executada sem trazer efeitos realmente significativos, devendo-se, sempre que necessário, compensar o efeito da absorção do agregado com um aditivo plastificante. Porém ressalva-se a interferência na consistência do concreto fresco, o que diz respeito às etapas de transporte, lançamento e adensamento do concreto.

## **4.2 DURABILIDADE**

Neste item são apresentados os resultados obtidos para as propriedades de durabilidade. Os dados foram analisados por regressão múltipla linear, considerando-se as variáveis de controle (ou fatores) propostas para esta pesquisa. Os resultados obtidos encontram-se nos apêndices, enquanto que nos próximos itens são apresentadas as figuras com os gráficos das curvas dos modelos resultantes da análise estatística, bem como a média dos valores observados nos experimentos. A representação gráfica das curvas de regressão permite comparar os valores modelados com os valores observados. Além disto, a análise estatística é apresentada na forma de tabelas com os parâmetros calculados para os fatores analisados, a ANOVA da regressão, bem como a equação resultante do ajuste matemático.

### **4.2.1 Absorção de água por capilaridade**

Na sequência, são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, apresentados na forma de absorção de água por área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), medida em concretos com idade de 28 dias. Os gráficos dos resultados obtidos ao longo do tempo, representando valores médios dos corpos-de-prova, estão apresentados nas Figura 34 a Figura 45.

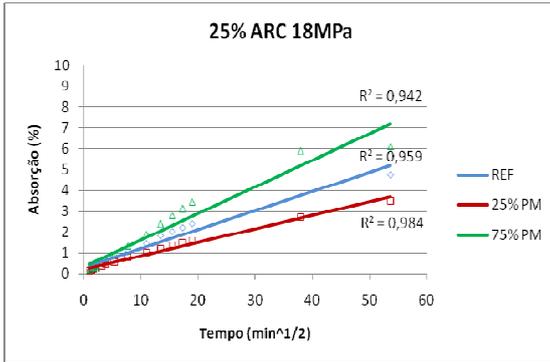


Figura 34 – Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC 18 MPa

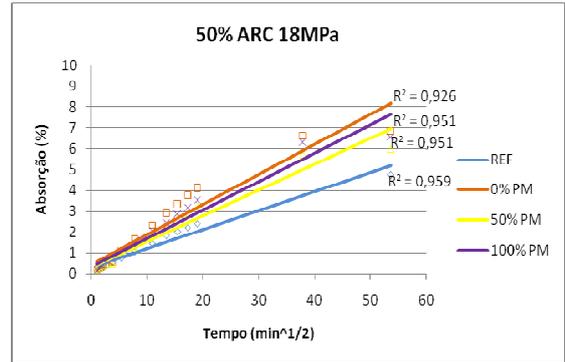


Figura 35 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC 18 MPa

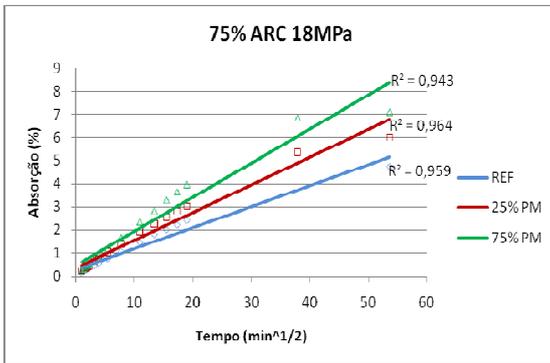


Figura 36- Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC 18 MPa

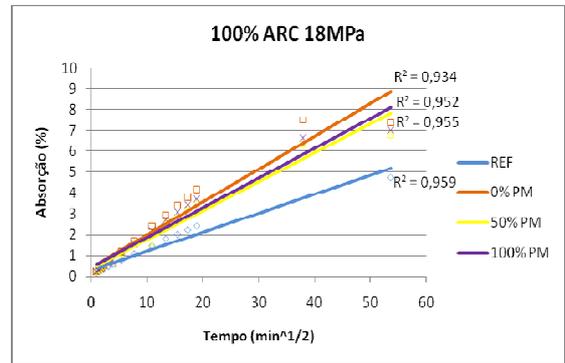


Figura 37 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC 18 MPa

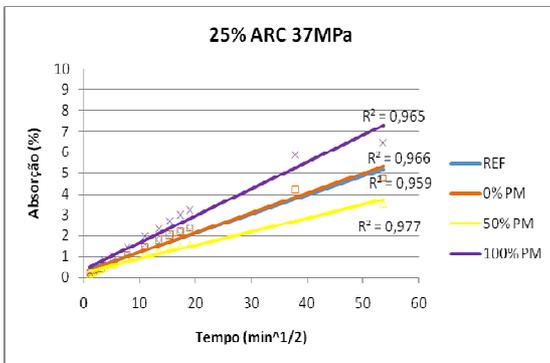


Figura 38- Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC 37 MPa

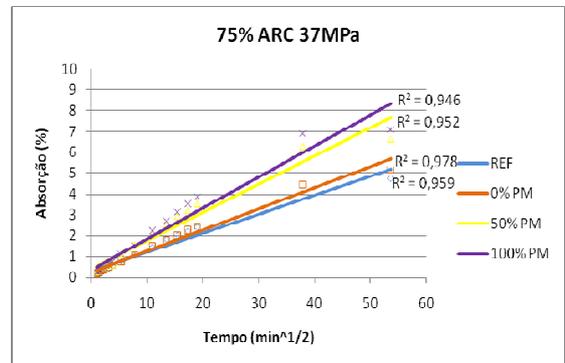


Figura 39 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC 37 MPa

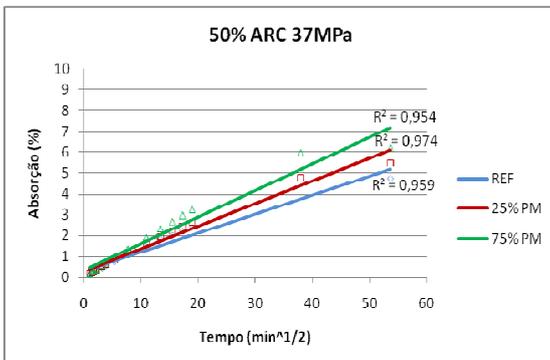


Figura 40 - Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC 37 MPa.

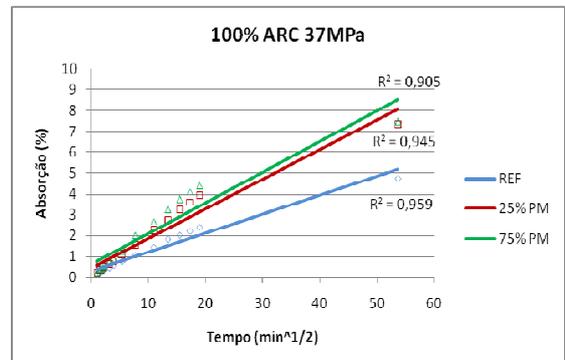
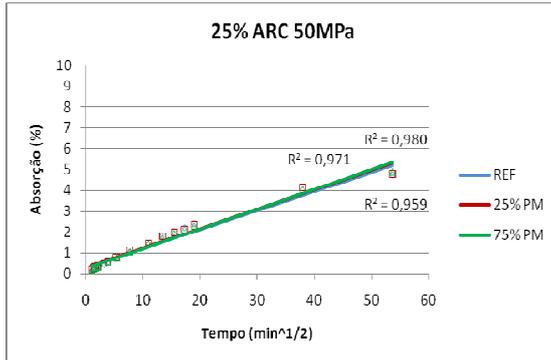
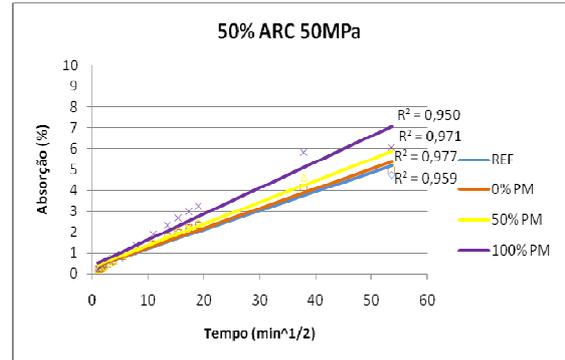


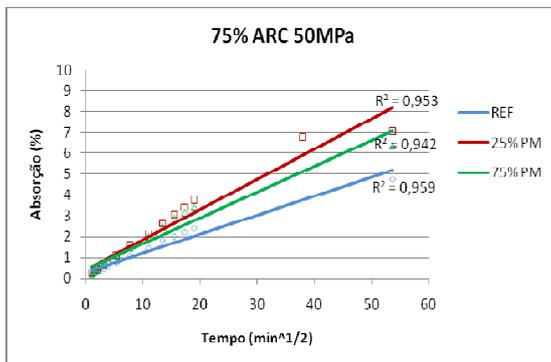
Figura 41 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC 37 MPa.



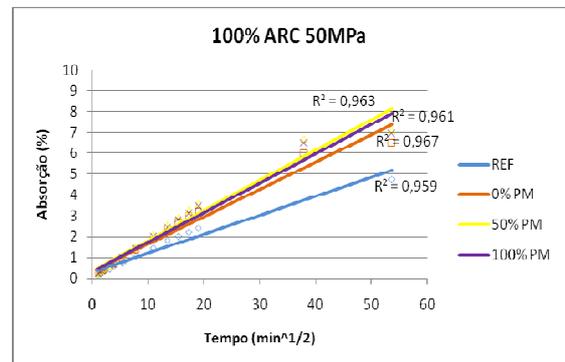
**Figura 42 - Absorção de água ao longo do tempo – 25% de ARC 50 MPa**



**Figura 43 - Absorção de água ao longo do tempo – 50% de ARC 50 MPa**



**Figura 44 - Absorção de água ao longo do tempo – 75% de ARC 50 MPa**



**Figura 45 - Absorção de água ao longo do tempo – 100% de ARC 50 MPa**

O modelo proposto para análise estatística da absorção de água é apresentado na Equação 8.

$$\text{ABS}_{\text{H}_2\text{O}} = b_0 + b_1 \times \text{ACF} + b_2 \times \text{TAG} + b_3 \times \text{TPM} + b_4 \times \text{TPM}^2 + b_5 \times \text{ABS} \times \text{ACF} + b_6 \times \text{ACF} \times \text{TPM} + b_7 \times \text{TAG} \times \text{TPM} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

ABS<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = absorção de água (g/cm<sup>2</sup>);  
 TAG = teor de substituição de agregado (%);  
 TPM = teor de pré-molhagem (%);  
 ACF = relação água/cimento final;  
 ABS = absorção do agregado (%).

A análise de variância (ANOVA) do modelo é apresentada na Tabela 17 e os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 17: Anova do modelo para absorção de água por capilaridade**

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	7	0,233059	0,0332942	12,28	0,0000
Resíduos	22	0,0596373	0,00271079		
Total Corrigido	29	0,292697			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

**Tabela 18- Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade**

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	1,46322	0,349455	4,18714	0,0004
ACF	b1	-1,67611	0,549887	-3,0481	0,0059
TAG	b2	0,00581171	0,00119515	4,86273	0,0001
TPM	b3	-0,0190954	0,00662685	-2,88153	0,0087
TPM^2	b4	0,0000526974	0,0000164424	3,20496	0,0041
ABS*ACF	b5	0,0282539	0,0110744	2,55127	0,0182
ACF *TPM	b6	0,0249873	0,00817842	3,05527	0,0058
TAG*TPM	b7	-0,0000443243	0,0000155035	-2,85899	0,0091

Onde: TAG= teor de substituição de agregado; TPM=teor de pré-molhagem; ACF= relação a/c final; ABS=absorção do agregado.

A análise de variância (Tabela 17) do modelo resultou em um valor de  $r^2$  de 0,7962, indicando que o modelo ajusta 79,62% dos valores observados para absorção total de água e o valor ‘p’ do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. Considerando a variabilidade do ARC e do ensaio, considera-se neste caso um coeficiente de determinação de 80% satisfatório. Outros autores também obtiveram um  $r^2$  desta ordem, entre eles Barata (1998) que obteve um  $r^2$  para os ensaios de absorção de água de 83% em concretos compostos com CP II-F-32 e adições pozolânicas.

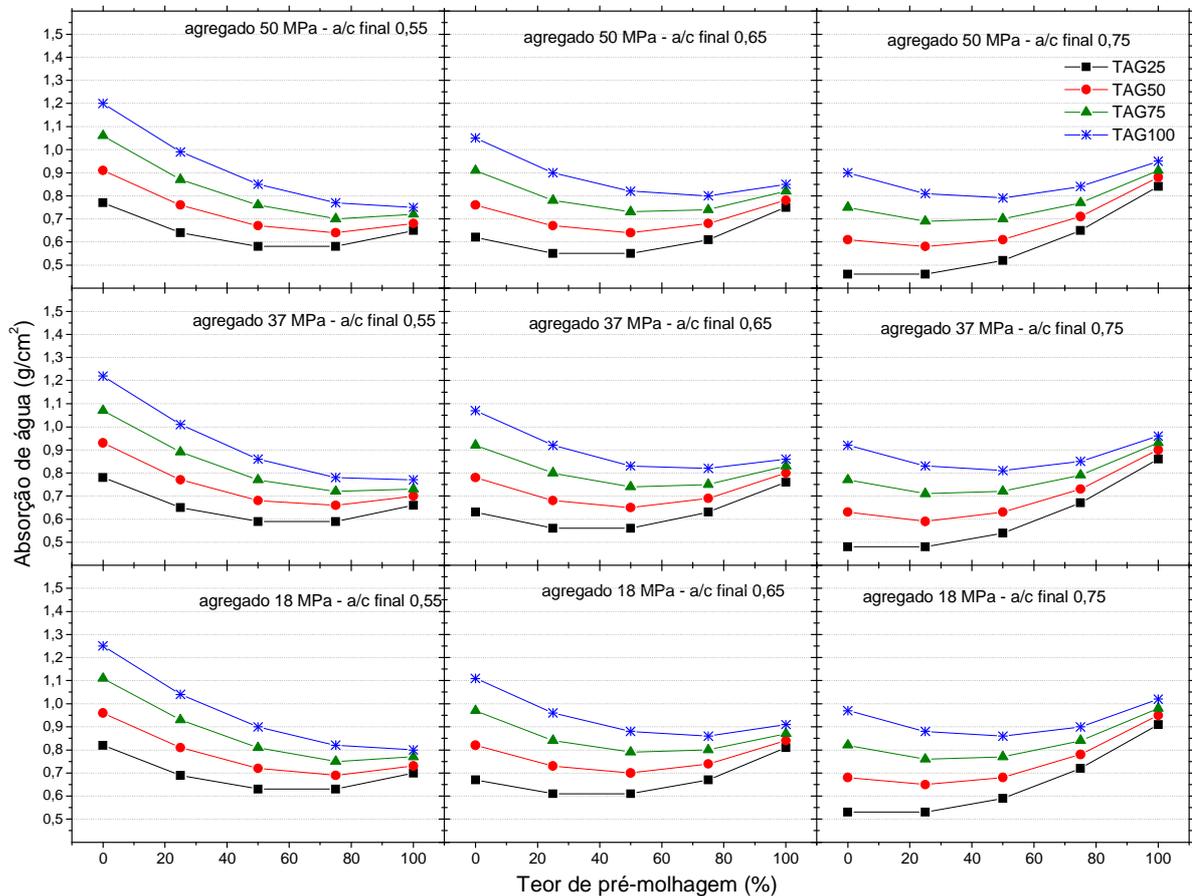
As variáveis independentes que descrevem o modelo, bem como as interações entre as mesmas, de ABS\_H<sub>2</sub>O apresentam-se estatisticamente significativas, a um nível de confiança de 99%, sendo o valor de “p” menor que 0,01. Entretanto observou-se um valor de “p” de 0,0180, para a interação das variáveis ABS×ACF. Uma vez que o valor de “p” apresenta ser menor que 0,05, este termo é estatisticamente significativo ao um nível de confiança de 95%. Desta forma, o modelo ajustado para a absorção de água está apresentado na Equação 9.

$$\begin{aligned} \text{ABS\_H}_2\text{O} = & 1,46322 - 1,67611 * \text{ACF} + 0,00581171 * \text{TAG} - 0,0190954 * \text{TPM} + & \text{Equação 9} \\ & 0,0000526974 * \text{TPM}^2 + 0,0282539 * \text{ABS} * \text{ACF} + 0,0249873 * \text{ACF} * \text{TPM} - \\ & 0,0000443243 * \text{TAG} * \text{TPM} \end{aligned}$$

Onde:

ABS\_H<sub>2</sub>O = Absorção de água por capilaridade, g/cm<sup>2</sup>;  
TAG = teor de substituição de agregado, com valores entre 25 e 100%;  
TPM = teor de pré-molhagem, com valores entre 25 e 100%;  
ACF = relação água/cimento final, com valores entre 0,55 e 0,86;  
ABS = absorção do agregado, valores entre 5,24 e 8,49%.

A Figura 46, apresenta os dados do ensaio de absorção de água por capilaridade, para três níveis fixos de relação a/c final, representado entre os menores e maiores a/c final utilizados no programa experimental.



**Figura 46-** Absorção de água por capilaridade dos concretos com o a/c final diferentes tipos de agregado.

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade demonstraram um aumento na absorção de água, para todos os traços confeccionados com ARC, quando comparados com o concreto de referência, porém seguiram uma mesma tendência de comportamento.

Como já era esperado, pode-se observar que quanto maior a relação a/c dos agregados, e menor resistência, maior é a absorção de água. O que é apresentado nos gráficos, mas que fica evidenciado para todos os tipos de agregado é que até um teor de 50% de pré-molhagem, quanto maior a relação a/c final, menor é absorção dos concretos novos. Para os percentuais de 75 e 100% de pré-molhagem este comportamento se inverte.

Para auxiliar as análises e discussões, foram traçadas curvas de comportamento para três níveis fixos de relação a/c final, compreendidos entre os limites do estudo, considerando

para as demais variáveis os mesmos níveis estudados. Estes gráficos são apresentados na Figura 46. O que pode ser observado neste caso é que fundamentalmente, para esta propriedade, as maiores diferenças de comportamento são observadas quando se varia o teor de ARC. Pode-se observar também que a interação entre teor de pré-molhagem e a/c final é observada na mudança na flexão das curvas, isto é, até um teor de 50% de TPM a absorção diminui quando a matriz apresenta uma relação a/c até 0,65 em média. Contudo, à medida que a relação a/c final aumenta, e com maior teor de pré-molhagem maior é a absorção do concreto novo.

Conforme Santos et al. (2002) os resultados encontrados para a absorção de água, quando comparados os valores dos concretos com ARC com os AGN (agregados naturais), percebe-se que os ARC, possuem uma maior absorção, mas esta propriedade parece não ser significativamente afetada pelo tipo dos concretos dos ARC.

Gomes e Brito (2008) concluíram em sua pesquisa que a absorção de água por capilaridade apontou claramente um aumento no coeficiente correspondente ao percentual de substituição, independentemente do tipo de agregado reciclado. Os concretos produzidos com ARC apresentaram um aumento no coeficiente de capilaridade em torno de 10% após 72h de ensaio, comparado aos concretos de referência.

Os dados obtidos nesta dissertação apontam um aumento de absorção de água em relação ao concreto de referência, como já era esperado. Enquanto que o concreto com 0% de ARC apresentou uma absorção total de água de 0,58 g/cm<sup>2</sup>, a média das absorções para os concretos com ARC de 50, 37 e 18 MPa foi, respectivamente, 0,71 g/cm<sup>2</sup>, 0,72 g/cm<sup>2</sup> e 0,75 g/cm<sup>2</sup>. Em valores percentuais, observa-se um aumento médio geral de 25% da absorção de água para os concretos com ARC em relação ao concreto sem ARC. Comparando-se os resultados com o trabalho de Gomes e Brito (2008), que trabalharam com ARC, os valores de aumento de absorção em relação ao concreto de referência na presente pesquisa foram maiores. Contudo, deve-se ressaltar que a matriz de concreto para emprego de ARC empregada por Gomes e Brito (2008) foi composta com uma relação a/c de 0,43, a presente pesquisa empregou uma relação a/c de 0,64.

#### **4.2.2 Penetração acelerada de íons cloreto**

A partir dos resultados das correntes observadas ao longo do tempo no ensaio, a carga total passante foi calculada, segundo a norma ASTM C 1202-07, que caracteriza a resistência à penetração de íons cloreto do concreto. Os dados das correntes observados nos ensaios estão

nos Apêncices e a carga total resultante para cada combinação de variáveis é apresentada na Tabela 19.

**Tabela 19 - Resultados das médias de carga total passante.**

Tipo de ARC	Teor de substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18 MPa a/c 0,85	25%		4924		5110	
	50%	8607		5814		6222
	75%		7946		9542	
	100%	9430		9158		9963
37 MPa a/c 0,56	25%	4795		5414		8388
	50%		5541		5846	
	75%	5405		6601		7380
	100%		8043		8680	
50 MPa a/c 0,43	25%		4742		4806	
	50%	6237		5634		5749
	75%		6312		6820	
	100%	6847		6832		8142

Obs.: O valor da carga total passante do concreto de referência é de 4077 Coumlombs.

O tratamento estatístico dos dados observados para a carga total passante em concretos foi realizado por meio de regressão múltipla linear. O modelo proposto para análise está apresentado na Equação 10.

$$Q = b_0 + b_1 \times TAG + b_2 \times TPM + b_3 \times TAG^2 + b_4 \times TPM^2 + b_5 \times ACF^2 + b_6 \times ABS \times TAG + b_7 \times TAG \times TPM + b_8 \times TAG \times ACF + b_9 \times TPM \times ACF \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Q = Carga total passante (Columbs)  
 TAG = teor de substituição de agregado (%)  
 TPM = teor de pré-molhagem(%)  
 ACF = relação água cimento final  
 ABS = absorção do agregado (%)

A análise de variância (ANOVA) do modelo calculado é apresentada na

Tabela 20 e os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) são apresentados na Tabela 21.

**Tabela 20- Anova do modelo para a carga passante**

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	9	7,1532	7948	17,68	0,0000
Resíduos	21	9,44282	2,50	1,21	
Total Corrigido	30	8,09748	2,49	1,21	

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O valor de ‘p’ menor que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  obtido de 0,8834 indica que o modelo explica 88,34% da variabilidade dos valores observados para carga total passante. Ressalta-se que a variabilidade do ensaio proposto pela ASTM C1202-07 é alta. Pereira (2001), por exemplo, ao empregar este mesmo ensaio para análise de concretos com diferentes tipos de cimentos em diferentes condições de cura, obteve um coeficiente de determinação em torno de 76%. Por sua vez, ao estudar-se a penetração de íons cloreto em concretos compostos com agregados reciclados de concreto, soma-se à variabilidade do método do ensaio a variabilidade dos agregados reciclados. Desta forma, considera-se o coeficiente de determinação  $r^2$  obtido nesta análise satisfatório.

Considerando-se as variáveis analisadas no modelo, e suas interações, os resultados da Tabela 21 indicam que o teor de substituição do agregado (TAG) e o teor de pré-molhagem (TPM) são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 99%, pois apresentaram valores de “p” menores que 0,01. A relação a/c final (ACF) apresenta efeito significativo na carga total passante, na forma de um termo quadrático, contudo a um nível de confiança de 90%, pois o valor de “p” para este fator é de 0,08.

**Tabela 21- Parâmetro das variáveis analisadas para a penetração acelerada de íons cloreto, baseado na carga total passante (ASTM C1202-07).**

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	-1864,92	3514,57	-0,530626	0,6012
TAG	b1	291,143	92,0107	3,16423	0,0047
TPM	b2	-339,905	84,4363	-4,02558	0,0006
TAG <sup>2</sup>	b3	0,602833	0,223394	2,69852	0,0135
TPM <sup>2</sup>	b4	0,903205	0,213384	4,23277	0,0004
ACF <sup>2</sup>	b5	14867,5	8232,41	1,80597	0,0853
ABS*TAG	b6	9,73207	1,46102	6,66117	0,0000
TAG*TPM	b7	0,837158	0,257582	-3,25007	0,0038
TAG*ACF	b8	-508,871	150,242	-3,38701	0,0028
TPM*ACF	b9	-460,893	110,221	4,18152	0,0004

Onde: TAG= teor de substituição de agregado; TPM=teor de pré-molhagem; ACF= relação a/c final; ABS=absorção do agregado

Também foi constatado que a interação da variável analisada ABS×TAG apresenta influência significativa na carga total passante. Este resultado indica que o tipo de agregado, nesta análise representada pela sua absorção (ABS), somente apresenta um efeito significativo quando associado ao efeito do teor de substituição de agregado (TAG) sobre a variável

estudada. As interações entre as variáveis analisadas TAG×ACF e TPM×ACF, também são fatores de controle que influenciam significativamente no comportamento da carga total passante, que retrata a resistência à penetração de íons cloreto, ao a um nível de 99%, configurando um valor de “p” menor do que 0,01, ou seja, comprovou-se que a interação entre estas variáveis são significativas estatisticamente. A Equação 11 apresenta o modelo adotado para a carga total passante.

$$\begin{aligned} \text{QM} = & -1864,92 + 291,143 \cdot \text{TAG} - 339,905 \cdot \text{TPM} + 0,602833 \cdot \text{TAG}^2 + \\ & 0,903205 \cdot \text{TPM}^2 + 14867,5 \cdot \text{ACF}^2 + 9,73207 \cdot \text{ABS} \cdot \text{TAG} - 0,837158 \cdot \text{TAG} \cdot \text{TPM} - \\ & 508,871 \cdot \text{TAG} \cdot \text{ACF} + 460,893 \cdot \text{TPM} \cdot \text{ACF} \end{aligned} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

QM = carga total passante (Coulombs);  
 TAG = teor de substituição de agregado (%)  
 TPM = teor de pré-molhagem (%)  
 ACF = relação água cimento final  
 ABS = absorção do agregado (%)

Na Figura 47 são apresentados os gráficos das curvas de comportamento de carga total, passante após 6 h de ensaio, para três níveis fixos de relação a/c final, elencados entre os menores e maiores valores de relação a/c final praticados no programa experimental.

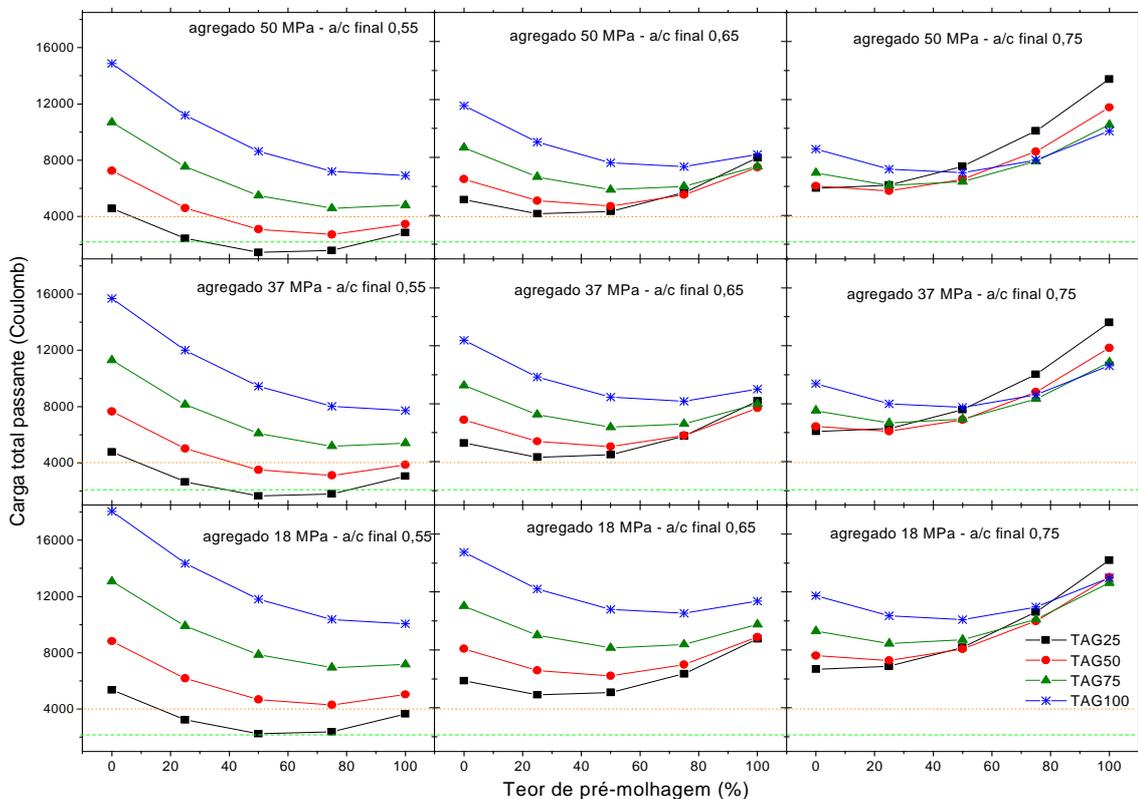


Figura 47- Carga total passante após 6 h de ensaio.

Pode-se observar nos gráficos da Figura 47, que os concretos com ARC de 18MPa que possuem um valor de pré-molhagem até 50% e maior percentual de substituição (TAG) e maior a/c final apresentaram uma carga total passante maior. No entanto quando o valor de pré-molhagem passa de 50% esta regra não é determinante, ou seja, o teor de substituição representa não ter influência e o comportamento se inverte. Pode-se ainda dizer que independente da resistência do ARC, os concretos que possuem um teor de pré-molhagem superior aos 50%, teores de substituição mais baixos e a/c final maior, apresentaram um valor maior de carga passante. No entanto pode-se salientar através dos resultados, que os traços produzidos com agregado reciclado (ARC) com resistência de 37 MPa e 50 MPa, apresentaram uma mesma tendência, concluindo que o tipo de agregado reciclado não teve um efeito significativo dentro da mistura. Contudo, o mesmo não ocorreu com os agregados reciclados de 18MPa, os quais possuem um a/c maior, apresentaram uma influência maior dentro da nova matriz de concreto.

Os resultados da carga total passante dos concretos produzidos com o ARC de 18 MPa apresentaram um aumento médio de 90,15% quando comparados com os concretos de referência. Da mesma forma os concretos com ARC de 37 e 50 MPa apresentaram respectivamente um aumento médio de 62,11% e 52,37% em relação aos concretos de referência.

Gomes e Brito (2008), evidenciaram em sua pesquisa, que os agregados reciclados de concreto, apresentaram uma penetração de íons cloreto ligeiramente superior, quando comparados com os concretos que continham agregado natural. Entretanto, para todos os casos, os limites de incorporação estudada, a perda de resistência à penetração de íons cloreto foi limitada em 6%, para as misturas que continham ARC. Novamente, destaca-se que a diferença da relação a/c da matriz do concreto onde foram incorporados os ARC pode ser a causa de tal diferença de comportamento dos resultados apresentados nas duas pesquisas, com valor de 0,43 para o trabalho de Gomes e Brito (2008) e 0,64 para o presente trabalho.

Observa-se nos gráficos da Figura 47 que o tipo de ARC exerce uma influência significativa sobre a carga total passante, pois os concretos que possuem ARC de resistência 37 e 50 MPa, apresentam um comportamento bem semelhante entre ambos, sendo que os concretos com ARC de 18 MPa apresenta um patamar de comportamento relativamente maior, conforme evidenciado nitidamente nos gráficos (a), (d) e (g) da Figura 47.

Outro aspecto importante a ser observado, é que quanto maior a relação a/c da matriz do concreto, maior é a carga passante, ou seja, menor é a resistência à penetração de íons cloreto, claramente evidenciado quando são comparadas entre si, para cada tipo de agregado, as curvas dos concretos com relação a/c 0,55, 0,65 e 0,75. Destaca-se também que é possível analisar os resultados para os traços produzidos com uma relação a/c final de 0,65, salientando que esta relação é similar a relação a/c do concreto de referência, cujo valor foi de 0,64. Assim, cabe salientar que o concreto de referência, cuja matriz é a mesma dos concretos com ARC, já é uma matriz com uma porosidade elevada, e este fato isoladamente já resulta em um concreto com uma alta penetrabilidade de cloretos, conforme classificação da norma ASTM C 1202-07. Desta forma, as médias dos resultados de carga total passante para os concretos com ARC os classificam como concretos com alta penetrabilidade de íons cloreto, e a carga total passante nos concretos com ARC foi maior que a do concreto de referência, para a relação a/c final 0,65, em todos os tipos de agregado, teor de substituição e teor de pré-molhagem.

Nos gráficos da Figura 47 estão traçadas duas linhas, uma relativa à carga total passante de 2000 e outra de 4000 Coulombs, indicando que os valores abaixo da primeira linha classificam os concretos como sendo de baixa penetrabilidade de íons cloreto, e os valores entre 2000 e 4000 Coulombs indicam concretos com moderada penetrabilidade de íons cloreto.

Observando os gráficos (a), (d) e (g) para a matriz com a/c final de 0,55, pode-se dizer que há uma tendência de comportamento onde, independente do tipo de agregado inserido, os traços com uma matriz de relação a/c final menor do que 0,55, contendo um teor de 25% de substituição de ARC e percentuais entre 50 e 75% de pré-molhagem, poderiam apresentar um valor de carga passante baixo, ou seja, uma baixa penetrabilidade de íons cloreto, segundo os índices de carga total passante especificado pela ASTM C1202-07.

Ao observar os gráficos com os resultados das cargas totais passantes, para os novos concretos com a/c final de 0,65, a tendência de comportamento até um percentual de 50% de TPM é invertido, ou seja, a interação entre teor de pré-molhagem (TPM) e a/c final é observado na mudança na flexão das curvas, isto é, depois do teor de 50% a carga passante aumenta. Entretanto, ficou constatado que o tipo de agregado não é determinante, quando esse está inserido dentro de uma matriz com uma relação a/c maior.

Na literatura há poucas pesquisas referentes ao uso de agregados reciclados de concreto (ARC), em uma nova matriz, fazendo a análise da penetração de íons cloreto. Desta forma, torna-se necessário fazer analogias com trabalhos, que apresentam certa semelhança.

Contatou-se que o resultado da carga total passante de um concreto com a relação a/c de 0,85 do ARC com um teor de substituição de 50% de ARC e com um percentual de 100% de pré-molhagem, é similar aos valores encontrados por Barata (1998) para os concretos de referência com um a/c de 0,64. Este autor em sua pesquisa enfocou a penetração acelerada de íons cloreto em concretos compostos por cimento Portland CP II F 32, empregando relações a/c entre, 0,39 e 0,64, adições de sílica ativa e metacaulim.

Poon e Kou (2006) mostraram em sua pesquisa, que com uma redução da relação a/c de 0,55 para 0,45, obtiveram um aumento significativo na resistência à penetração de íons cloreto, uma vez que o volume de poros diminui e assim torna o concreto menos permeável e em conformidade a resistência à penetração de íons cloreto aumenta. Os resultados apresentaram uma diminuição da resistência à penetração de íons cloreto, com o aumento do agregado reciclado. No entanto segundo os autores essa compensação na redução poderia ser feita através da utilização de um teor de adição entre 25 a 35% de material pozolânico. Desta forma, fica evidenciado que a relação a/c final da matriz de cimento exerce grande influência no comportamento da propriedade em questão e se o presente programa experimental tivesse contemplado outras matrizes de concreto, possivelmente teriam-se resultados mais satisfatórios.

Destaca-se também, que a análise estatística dos resultados indica que, em média, quanto maior o teor de substituição de ARC e o percentual de pré-molhagem, maior é a carga total passante, assim sendo estes fatores mais determinantes do comportamento frente à penetração de cloretos do que a porosidade do agregado, traduzida pela resistência à compressão do ARC. No entanto, existe algum valor de resistência à compressão do ARC, entre 18 e 37MPa, onde há uma inflexão no comportamento do concreto com ARC, relacionando à penetração de íons cloreto. Nos ARC. de maior resistência, (37 e 50 MP) não há diferença expressiva neste comportamento.

#### **4.2.3 Ensaios de absorção de cloretos por capilaridade**

O ensaio de absorção de cloretos, foi baseado na TC 166 PCD (RILEM,1999), adaptando o ensaio conforme o ensaio de absorção de água por capilaridade. Na literatura foi difícil encontrar ensaios para a verificação da absorção de íons cloreto no concreto com este

método, porém o ensaio de absorção por capilaridade de cloreto foi desenvolvido, porque é o principal mecanismo quando a estrutura está submetida a constantes ciclos de molhagem e secagem, fazendo com que a água evapore e o sal se deposite no concreto. Outro aspecto importante é a duração do ensaio, já que na maioria das pesquisas o ensaio de permeabilidade de cloretos tem um prazo mínimo de duração de 91 dias.

Na Tabela 22 são apresentados os resultados das médias encontrados nos diferentes tipos de concretos, referente aos ensaios em laboratório.

**Tabela 22- Os resultados das médias de absorção de cloretos por capilaridade**

Tipo de ARC	Teor de substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
a/c 0,85	25%		0,77		0,76	
(18 MPa)	50%	0,88		0,77		0,80
	75%		0,86		0,90	
	100%	0,91		0,97		0,89
		0%	25%	50%	75%	100%
a/c 0,56	25%	0,62		0,61		0,87
(37 MPa)	50%		0,69		0,80	
	75%	0,70		0,80		0,94
	100%		9,2		9,0	
		0%	25%	50%	75%	100%
a/c 0,43	25%		0,72		0,78	
(50 MPa)	50%	0,77		0,76		0,82
	75%		0,85		0,88	
	100%	0,84		0,90		0,99

O modelo proposto para a análise de absorção de cloretos segue a Equação 12.

$$ABS_{Cl} = b_0 + b_1 \times ABS + b_2 \times TAG + b_3 \times TPM + b_4 \times ABS^2 + b_5 \times TPM^2 + b_6 \times TAG^2 + b_7 \times TAG \times TPM + b_8 \times TAG \times ACF + b_9 \times TPM \times ACF \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

ABS<sub>CL</sub> = absorção de cloretos por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

TAG = teor de substituição de agregado (%)

TPM = teor de pré-molhagem (%)

ACF = relação água cimento final

ABS = absorção do agregado (%)

A análise de variância (ANOVA) do modelo proposto é apresentada na Tabela 23 e a análise dos parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 23-ANOVA do modelo para a absorção de cloretos por capilaridade**

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	9	0,235469	0,0261632	17,61	0,0000
Resíduos	20	0,0297181	0,0148591		
Total Corrigido	29	0,265187			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

A análise de variância (Tabela 23) do modelo resultou em um valor de  $r^2$  de 0,8879 indicando que o modelo explica 88,79% dos valores observados para taxa de absorção de cloretos por capilaridade e o valor 'p' menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%.

**Tabela 24- Parâmetro das variáveis analisadas, para a absorção de cloretos.**

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	1,93224	0,38345	5,03909	0,0001
ABS	b1	-0,40016	0,112418	-3,55957	0,0020
TAG	b2	0,0103494	0,00394909	2,62069	0,0164
TPM	b3	-0,0240487 -	0,00482591	-4,98324	0,0001
ABS <sup>2</sup>	b4	0,0305596	0,00811366	3,76644	0,0012
TPM <sup>2</sup>	b5	0,0000595539	0,0000121663	4,89499	0,0001
TAG <sup>2</sup>	b6	0,0000242362	0,0000122307	1,98159	0,0614
TAG*TPM	b7	-0,0000353382	0,0000153219	-2,30638	0,0319
TAG*ACF	b8	-0,013186	0,00487573	-2,70441	0,0136
TPM*ACF	b9	0,0320967	0,00625416	5,13205	0,0001

Onde: TAG= teor de substituição de agregado; TPM=teor de pré-molhagem; ACF= relação a/c final; ABS=absorção do agregado

O valor de "p" menor do que 0,01 (Tabela 24) indica que variáveis de controle ou fatores analisados, ABS (absorção do agregado) e TPM (teor de pré-molhagem) apresentam-se estatisticamente significativos a um nível de confiança de 99%. O teor de substituição (TAG) apresenta efeito significativo na absorção de cloretos por capilaridade, contudo a um nível de confiança de 90%, pois o valor de "p" para este fator é de 0,084.

É possível analisar também as interações referentes às variáveis, TPM×ACF que apresenta influência significativa na absorção de cloretos por capilaridade, a um nível de 99%, configurando um valor de "p" menor do que 0,01, ou seja, comprovou-se que a interação entre estas variáveis são significativas estatisticamente. As interações entre as variáveis analisadas TAG×ACF e TAG×TPM, também são fatores de controle que influenciam significativamente no comportamento da absorção de cloretos, que indica um nível de confiança de 90%, respectivamente com um valor "p" de 0,086 e 0,068. O modelo adotado para a absorção de cloretos por capilaridade é apresentado a seguir, na Equação 13.

$$\begin{aligned} \text{ABS\_CL} = & 1,93224 - 0,40016*\text{ABS} + 0,0103494*\text{TAG} - 0,0240487*\text{TPM} + \quad \text{Equação 13} \\ & 0,0305596*\text{ABS}^2 + 0,0000595539*\text{TPM}^2 + 0,0000242362*\text{TAG}^2 - \\ & 0,0000353382*\text{TAG}*\text{TPM} - 0,013186*\text{TAG}*\text{ACF} + 0,0320967*\text{TPM}*\text{ACF} \end{aligned}$$

Onde:

ABS\_CL= absorção de cloretos por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

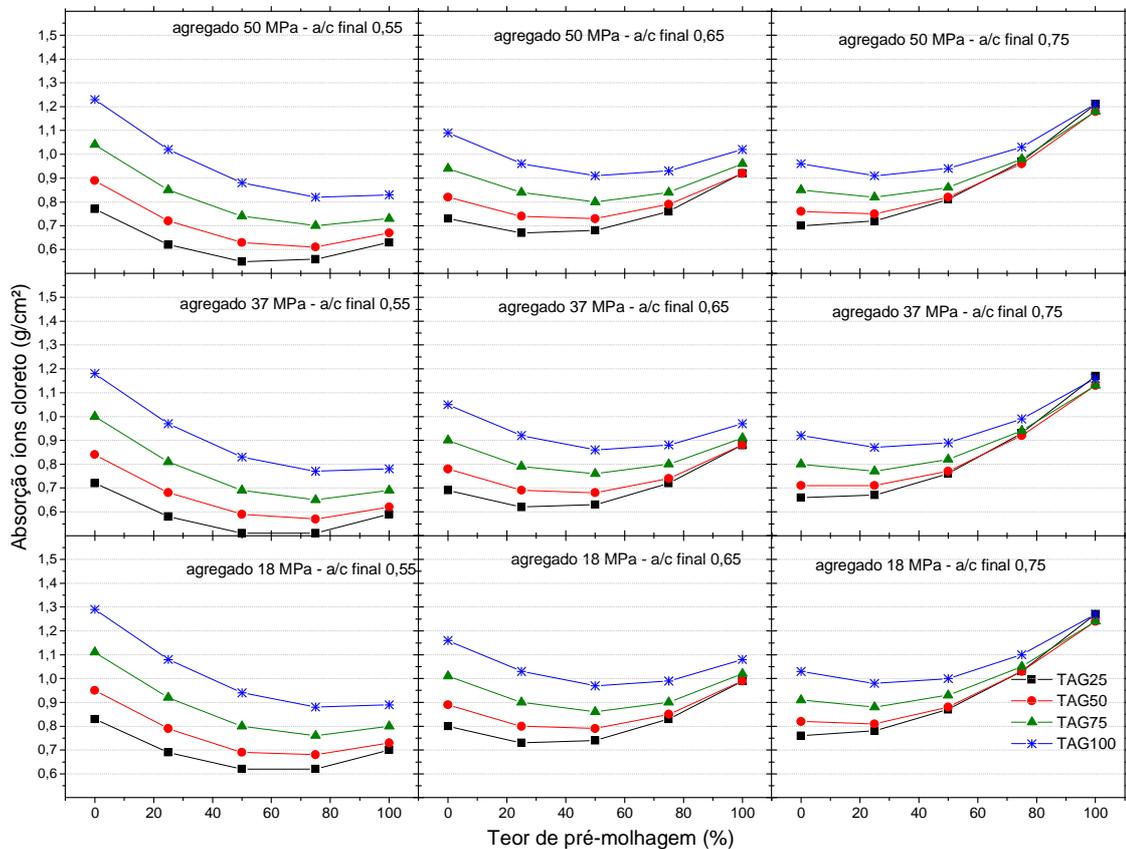
TAG = teor de substituição de agregado (%)

TPM = teor de pré-molhagem (%)

ACF = relação água /cimento final

ABS = absorção do agregado (%)

A Figura 48 apresenta os resultados equivalentes dos concretos produzidos, com o a/c final dos três níveis fixos e diferentes tipos de agregados.



**Figura 48- Absorção de cloretos por capilaridade com o a/c final dos concretos - diferentes tipos de agregado**

Pode-se observar nos gráficos uma tendência já esperada, sendo que os concretos de baixa resistência e com os maiores teores de substituição de agregado reciclado de concreto e maiores percentuais de pré-molhagem foram os que apresentaram uma maior absorção de íons cloreto. Seguindo a tendência dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade.

Conforme os resultados, quanto maior a relação a/c dos agregados, e menor resistência, maior é a absorção de cloretos, o que é apresentado nos gráficos da Figura 48. Mas o que fica evidenciado para todos os tipos de agregado é que até um teor de 50% de pré-molhagem, quanto maior for a relação a/c final, menor é absorção dos concretos novos. Logo após o aumento dos percentuais de 75 a 100% de pré-molhagem este comportamento se inverte.

Os valores alcançados nos ensaios demonstraram que a porosidade do agregado reciclado de concreto, não foi determinante como era o esperado, mas os traços com ARC de 18 MPa, apresentaram uma maior absorção à cloretos, seguindo a tendência por ser um agregado mais poroso. No gráfico da Figura 48, observou-se que os concretos com a/c de 0,56 e teor de substituição de 25% e percentual de pré-molhagem até 50%, foram os concretos que apresentaram melhores resultados quando comparados com os concretos de referência.

Desta forma, pode-se analisar também, que os melhores resultados seriam para os concretos produzidos com um ARC 0,43 (50MPa), o que não foi o caso, pois os concretos com ARC 0,56 (37 MPa), foram os que apresentaram uma absorção de cloretos menor. Deste modo, cabe dizer que os concretos produzidos com ARC apresentaram uma diminuição média de 21,73% na resistência à penetração de íons cloreto por absorção de capilaridade, quando comparados aos concretos de referência.

É possível constatar através das curvas traçadas, representando o comportamento dos três níveis fixos de relação a/c finais, conforme os gráficos da Figura 48, verificou-se as diferenças de comportamento quando o teor de ARC varia. Conforme o gráfico é possível constatar que os concretos com maior teor de ARC e resistência do agregado de 18 MPa, apresentaram uma maior absorção de cloretos. Entretanto quando se simulou a inserção dos agregados na matriz com a/ c final de 0,75, o tipo de agregado parece não ser determinante do comportamento do concreto para esta propriedade, e o percentual de pré-molhagem apresentou uma maior influência na absorção de cloretos nesta matriz. Pode-se observar desta forma, que, numa matriz mais porosa, o tipo de agregado apresenta menor influência na absorção de  $Cl^-$ . Também pode-se observar, analisando as curvas da Figura 48 a pré-molhagem apresenta um maior efeito na absorção de  $Cl^-$  quando matriz com um a/c final maior.

Desta forma é prudente afirmar que o efeito da interação entre teor de pré-molhagem e a/c final pode ser observado pela mudança na flexão das curvas de comportamento, ou seja,

para um teor de 50% de TPM a absorção diminui quando a matriz apresenta uma relação a/c até 0,65 em média. Contudo, à medida que a relação a/c final aumenta, e com maior teor de pré-molhagem maior é a absorção de  $\text{Cl}^-$  do concreto novo.

Segundo Andrade (1992), a determinação das condições da superfície do concreto pelo ensaio de absorção apresenta vantagens, pois fornece resultados em curto período de tempo, sendo um indicativo importante da durabilidade do concreto, servindo como subsídio para a análise dos resultados obtidos nos ensaios de determinação da resistência à penetração de cloretos. Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de cloretos por capilaridade apresentam uma boa relação com os ensaios de penetração acelerada de íons e cloreto e também com os ensaios de absorção de água. Contudo, estes mesmos resultados permitem inferir que as tendências de comportamento em matrizes menos porosas poderão apresentar uma perda de significância desta relação entre os três ensaios, o que poderá ser confirmado quando forem testados em uma análise de correlação.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pesquisas que relacionam o estudo do agregado reciclado de concreto (ARC) frente à penetração de íons cloreto são muito recentes e a bibliografia referente ao tema é bastante escassa e contraditória também. Na bibliografia não existe um consenso em relação ao uso de ARC na produção de novos concretos, nem tampouco sobre o estudo da durabilidade, referente aos ataques agressivos dos íons cloreto. Agente esse considerado o mais problemático no meio científico.

A partir dos dados obtidos e tendo em vista os objetivos estabelecidos no presente trabalho, podem ser tecidas as considerações expostas na sequência, que retringem-se ao escopo do trabalho.

**Quanto à influência da porosidade do ARC, que, neste trabalho foi testada a partir de concretos com diferentes resistências à compressão variando de 18 a 50 MPa, obteve-se as seguintes conclusões:**

- em relação à penetração acelerada de íons cloreto, a porosidade do agregado foi testada em função da sua absorção e as análises indicaram que esta variável apresenta efeito significativo nesta propriedade somente na interação com a variável ‘teor de agregado’. De maneira geral, pode-se dizer que os concretos produzidos apresentaram um decréscimo na resistência à penetração de íons cloreto decorrente da porosidade do ARC, ou seja, quanto menor a resistência do ARC, neste caso 18MPa, maior é a carga passante, e conseqüentemente menor é a resistência à penetração de íons cloreto. Contudo, observando os agregados com maior resistência, neste caso acima de 37 MPa, os valores não apresentam diferença significativa entre si. Outro aspecto observado foi quanto à relação a/c final da matriz do concreto, observando-se que quanto maior a relação a/c maior é a carga passante, independente do tipo de ARC, pois quando é inserido o agregado em uma matriz que já apresenta alta porosidade, a resistência do ARC parece não influenciar nos resultados;
- ao analisar a absorção de cloretos por capilaridade, observou-se que a porosidade dos ARC apresenta efeito significativo nos resultados obtidos. Os traços com ARC de 18 MPa apresentaram uma maior absorção à cloretos,

seguindo a tendência dos dados de penetração acelerada de íons cloreto, por ser um agregado mais poroso. Observou-se também que os concretos com 37 MPa, teor de substituição de 25% e percentual de pré-molhagem até 50% apresentaram melhores resultados que o concreto de referência. Salienta-se que a porosidade do agregado acima de um certo limite passa a não apresentar, tecnicamente, diferenças relevantes entre os valores de absorção de íons cloreto;

- os resultados encontrados para a análise dos concretos em relação à absorção de água por capilaridade seguiram o mesmo comportamento indicado para os ensaios de absorção de cloretos. Os concretos produzidos com ARC com menor resistência à compressão foram os que apresentaram uma maior taxa de absorção, quando comparados com os concretos de referência;
- quanto à resistência à compressão axial dos novos concretos é relevante destacar que o “tipo de agregado” apresentou um forte efeito significativo no comportamento desta propriedade. Desta forma, pode-se inferir que quanto menor a resistência à compressão do ARC, menor a resistência à compressão dos novos concretos, mas destacando que depende da relação entre a resistência do agregado e a resistência da matriz. Entretanto, pela análise estatística dos resultados pode-se afirmar, que a partir de um dado limite de resistência do ARC, por volta de 30 a 35 MPa, ao aumentar a resistência do concreto reciclado inserido em uma nova matriz as diferenças das resistências à compressão dos novos concretos não apresentarão diferença significativa. Conforme os dados obtidos, torna-se necessário ter cautela na utilização de ARC, proveniente de construções mais antigas, que apresentam uma resistência à compressão  $f_{ck}$  em torno de 15 e 18 MPa, sendo indispensável uma caracterização rigorosa destes resíduos;
- entretanto a análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos novos concretos indicou que o fator “tipo de agregado”, representado pela resistência à compressão do agregado, que esta variável de controle exerce uma influência muito fraca no comportamento da propriedade em questão. Segundo a análise estatística a variação média à tração, entre os níveis do tipo de ARC, indicaram um valor de apenas 3%;

**Quanto à influência da variável ‘teor de substituição dos agregados naturais por ARC’, que variaram de 0 a 100%, pode-se considerar que:**

- Para o ensaio de penetração acelerada de íons cloreto, pode-se afirmar, a partir da análise de regressão dos resultados obtidos, que esta variável apresenta um efeito isolado significativo no comportamento dos concretos. Contudo, esta variável em interação com o teor de pré-molhagem também apresenta um efeito significativo, o que se traduz pelo fato de que até uma pré-molhagem de 50% quanto maior o percentual de substituição (TAG) maior será a carga total passante, assim comprovando a influência do teor de substituição. No entanto quando o valor de pré-molhagem passa de 50% este comportamento parece não ser significativo, ou seja, o teor de substituição representa não ter uma forte influência. A variável ‘teor de substituição de agregado’ também apresenta efeito significativo quando em interação com a relação água/cimento final da matriz;
- em relação à absorção de cloretos por capilaridade os resultados demonstraram a mesma tendência de comportamento observado para penetração acelerada de íons cloreto, inclusive em relação à interação com o teor de pré-molhagem, pois até um teor de 50% de pré-molhagem, quanto maior o teor de substituição, maior a taxa de absorção de íons cloreto;
- os resultados obtidos nos ensaios e a análise da absorção de água por capilaridade indicaram que o teor de substituição dos agregados naturais pelos ARC apresentou claramente que quanto maiores os teores de substituição de ARC, maiores são as taxas de absorção de água ao longo do tempo. No entanto alguns traços com 25% e 50% de teores de substituição apresentaram valores de taxa de absorção menores que o do concreto de referência, ou seja, pode-se verificar que existe um teor ideal de substituição para a produção de concretos com ARC;
- nas análises de resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, pode-se observar que o fator teor de substituição (TAG) de ARC exerce influência sobre a variável analisada, indicando que até 50% de substituição de agregado natural por ARC as resistências à compressão dos novos concretos são bem semelhantes à resistência à compressão do concreto de referência. Porém,

verificou-se que acima deste teor de ARC, as resistências dos novos concretos diminuem na ordem de 10% com o aumento de teor de ARC, em relação ao concreto de referência;

- com relação à resistência à tração por compressão diametral nos novos concretos, foi observado que o TAG apresentou um forte efeito isolado sobre esta propriedade, inferindo claramente que quanto maior o teor de substituição menor é a resistência à tração. O comportamento dos resultados obtidos para resistência à tração acompanha a tendência de comportamento da maioria dos resultados encontrados em trabalhos com utilização de agregados reciclados.

**Quanto ao efeito da variável ‘teor de pré-molhagem dos ARC’, que foi testada em níveis de 0 à 100%, pode-se afirmar que :**

- na penetração acelerada de íons cloreto, pode-se inferir que o percentual de pré-molhagem (TPM) , quando passa do valor de 50% e apresenta um valor maior no a/c final, demonstrou aumentar a carga total passante dos concretos. Outro aspecto que pode- se salientar é entre a interação da variável TPM com a variável TAG. Os traços que apresentam menores percentuais de pré-molhagem e maiores teores de substituição de ARC, conseqüentemente apresentaram maiores valores na carga total passante.
- com relação aos ensaios de absorção de cloretos por capilaridade, os resultados indicaram que os concretos produzidos com ARC independente do tipo de agregado, mas com teores de até 50% de pré-molhagem e maior a/c final, apresentaram valores menores de absorção de cloretos por capilaridade nos novos concretos. Sendo que quando o percentual de TPM é aumentado de 75 a 100%, este comportamento se inverte. Observando uma significativa influência da variável TPM na absorção de cloretos.
- apresentando uma mesma tendência de comportamento, pode-se ressaltar sobre a variável analisada absorção de água por capilaridade, que o fator TPM, apresenta ser significativo dentro da nova matriz de concreto. Pode-se observar que a interação entre o teor de pré-molhagem e a/c final, isto é, até um teor de 50% de TPM a absorção diminui quando a matriz apresenta uma relação a/c até 0,65 em média. Contudo, à medida que a relação a/c final aumenta, e com maior teor de pré-molhagem maior é a absorção de água dos concretos novos.

Contudo pode-se afirmar que, ao estudar a durabilidade dos concretos reciclados, a pré-molhagem exerce influência nas variáveis de resposta estudadas.

- conforme os resultados analisados através da análise estatística, observou-se que o fator “teor de pré-molhagem”(TPM) é significativo, porém a TPM causou uma grande variabilidade nos resultados, o que não representou uma tendência de comportamento clara para esta propriedade .
- entretanto, a análise estatística indicou que o “teor de pré-molhagem não apresentou um efeito significativo ao analisar seu efeito isolado sobre a resistência à tração. Estes valores indicam que esta variável de controle exerce uma influência muito fraca no comportamento da propriedade em questão, A variação média observada nos resultados entre os níveis de teor de pré-molhagem é de apenas 5%, ficando evidenciando um nível baixo de significância.
- contudo, acredita-se que para empregar o ARC na produção de concretos comerciais deve-se eliminar a pré-molhagem, já que a importância deste fator não ficou fortemente evidenciada na análise das propriedades mecânicas. Por sua vez esta é uma tarefa a mais a ser executada na produção de novos concretos e sem trazer efeitos realmente significativos, devendo-se analisar e compensar o efeito da absorção do agregado com um aditivo plastificante.

Conforme os resultados obtidos através das análises estatísticas de durabilidade dos concretos reciclados, ficou evidenciando uma mesma tendência para todas as variáveis estudadas. Desta forma pode-se salientar que quanto maior o percentual de substituição em uma matriz com uma relação a/c maior que 0,65 e com um teor de pré-molhagem acima de 50%, as propriedades do concreto ficaram prejudicadas. Assim através dos resultados desta pesquisa pode-se inferir que um concreto reciclado “ideal”, seria produzido com uma resistência do ARC. de 37 MPa, inserido em uma matriz com relação a/c até 0,65 e com um teor de substituição até 50% e um teor de pré-molhagem até 50% .

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, é importante ressaltar que existem ainda poucos trabalhos referentes à durabilidade dos concretos produzidos com ARC, principalmente com enfoque relativo à penetração de íons cloreto. Porém é importante se ter uma caracterização deste agregado. Por ser um material com variabilidade e diferentes

porosidades, sua utilização deve ser cautelosa, pois o seu reaproveitamento ocorre com a sua inserção dentro de uma matriz de concreto que também é um material heterogêneo. A *caracterização do agregado reciclado de concreto* é essencial para se ter uma maior confiabilidade em sua utilização, já que o mesmo depende de inúmeros fatores, como foi apresentado nos resultados deste trabalho

Deve-se ressaltar que, assim como outros autores que estudaram diferentes tipos de concretos, a porosidade do concreto adotado como matriz para a inserção do ARC já apresentava condições que facilitavam o ingresso de íons cloreto, medidos por testes acelerado e de absorção. À medida que é introduzido um material mais poroso do que a brita natural, aumenta-se a porosidade do novo concreto, o que é prejudicial para a resistência à penetração de íons cloreto. Sendo assim, este trabalho trouxe algumas respostas e dúvidas também, sobre a utilização de ARC em novos concretos e a sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade. Desta forma, as lacunas abertas a partir deste trabalho são postas como sugestões futuros trabalhos.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tendo em vista os questionamentos surgidos a partir deste estudo, e que não puderam ser contemplados no escopo do trabalho, são formuladas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- testar a inserção de ARC com diferentes porosidades em diferentes matrizes, com níveis de variação fixos;
- analisar a influência do agregado reciclado de concreto, compensando a perda de abatimento com aditivos. Desta forma, a porosidade inicial da matriz se mantém ao longo das diversas combinações de variáveis, evitando um acréscimo de água na matriz de concreto, sem ocasionar um diferente 'a/c final' para os traços;
- estudar a inserção de material pozolânico como um recurso para emprego teores altos de ARC, sem ocasionar perdas significativas nas propriedades do concreto no estado endurecido,
- acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão axial ao longo das idades e em diferentes condições de cura.

- realizar testes comparando as várias formas de preparar os corpos-de-prova para o método de penetração acelerada de íons cloreto conforme ASTM C1202-07.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T-277: **Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Washington D. C., 2007.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. **Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento Portland**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1997, p.555-562.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1991. V.1: Corrosion of metals in concrete.
- 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.
- ANDRADE, M.C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. Trad Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini:1992.
- ANDRADE, C. **Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements**. Cement and concrete research, v. 23, p. 724-742, 1993.
- ANDRADE, C. **O limite do tempo**. Técnica, São Paulo, Pini, n.3, p.20-23 mar/abr. 1993.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. **On site measurements of corrosion rate of reinforcement**. Construction and Building Materials, v. 15, p. 141-145, 2001.
- ANFAC. **Reciclagem: consciência ecológica e desenvolvimento econômico**. Construção Civil. Disponível em: <http://www.anfac.com.br>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2009.
- ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição de reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica- Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; KAHN, H. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. Brasil - São Paulo, SP. 2004. 13 p. Conferência latino-americana de construção sustentável, 2004, São Paulo; Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10, 2004, São Paulo. Anais eletrônicos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto- Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos: áreas de transbordo e triagem: diretrizes para projetos, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes- aterros- diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil- áreas de reciclagem- diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos da construção civil- execução de camadas de pavimentação- Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776.** Determinação da Massa Específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

BARATA, M.S. **Concreto de Alto Desempenho no Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** 1998. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** 1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1999.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; PEDEFERRI, P. **Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current.** Corrosion Science, v.49, n.3, p.1056-1068, mar. 2007.

BRITO, J.de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. **Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled aggregates.** Cement & Concrete Composites, Vol. 27, N. 4, pg 429-433, 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto- influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 2003. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos- Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da Eficácia do Ensaio de Migração em Condições de Fluxo Não Estacionário na Previsão da Penetração de Cloretos em Concreto.** 2004. 213p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CARÉ, S. **Effect of temperature on porosity and chloride diffusion in cement pastes.** Science Direct. Construction and Building Materials xxx. pg, 1-14, march, 2007.

CARRIJO, P.M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção de demolição no desempenho mecânico do concreto.** 2005.146p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil).Escola Pontifícia da Universidade de São Paulo.Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto.** São Paulo: PINI, 1997.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB - Working guide for durable concrete structures – protection of reinforcement: report of CEB-RILEM International Workshop.** Bulletin D'Information n. 152, Paris, 1984.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete.** Bulletin D'Information, N° 199.

CONAMA (2002) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002. [http : //www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html). Acesso em 20 de março de 2009.

COSTA, P.E.F. **Influência da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto**. 2001. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2001.

DAL MOLIN, D. C.C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. **Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil**. Ambiente construído, Porto Alegre, v.5, n.2, p.37- 49, abr / jun, 2005.

DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. **Prediction of diffusion coefficients in cement-based materials on the basis of migration experiments**. Cement and Concrete Research, v.26, n.12, p.1831-1842, 1996.

DHIR, R.; PAINE, K.; DYER, T. TANG, A. **Value-added recycling of domestic, industrial and construction arisings as concrete aggregate**. Concrete Engineering International, Spring, p. 43-48, 2004b.

EGUCHI, K.; TERANISHI, K; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. **Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction**. July, de 2007. Construction Building Materials, Vol 21,n.7,p.1542-1551, July 2007.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações. Geraldo Isaia (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed . Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1996. 345p.

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

GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS. **Technical Bulletin TB-0100: understanding aashto T277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test**. Cambridge, Canadá, 2006. Disponível em: [http://www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/TB\\_0100B.pdf](http://www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/TB_0100B.pdf). Acesso em: 14 de junho de 2009.

GRIGOLI, A.S. **Reciclagem de entulho em canteiro de obras – Viabilidade econômica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43.,2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001.

GRUB, M. **Estudo das propriedades no estado fresco e mecânicas de concretos com agregado reciclado de concreto**. 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010 – Em desenvolvimento

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, P.R.L. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto**. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais**. São Leopoldo, 1997.p.31-42.

HELENE, P. R. L.; GALANTE, R. **Concreto Colorido**. São Paulo, 1999. In: Congresso Brasileiro do Cimento, 5°. **Anais**. São Paulo: Congresso Brasileiro de cimento (CBO), 1999 (CD-ROM).

HELENE, P.e TERZIAN, P. **Manuel de dosagem e controle do concreto**. Ed, Pini, São Paulo, 1992, 349 p.

HOFFMANN, A. T. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre, 2001. 150p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IBRACON. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor G. C. ISAIA – vol.1 e vol. 2. São Paulo, 2005.

ISAIA, G.C. **Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: 1996. p.554-565.

JOHN, V.M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: CASSA, J.C.S.; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

JOHN, V. M. **Panorama da Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. 1999. Qualidade na Construção, n.º 20 Ano III, 1999.

JUCÁ, T. K. P. **Avaliação de cloretos livres em concreto e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2002. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

KATZ, A. **Treatments for the improvement of recycled aggregate**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, N. 06, pg. 597- 602, 2004.

KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M. P.; BOITO, D.; GARCIA, A. C.A. **Estudo comparativo da geração de resíduos de construção e demolição em São Leopoldo e Novo Hamburgo**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído- ENTAC, 2006.

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com Adição de Microssílica para Reparos Estruturais: Estudo da Penetração de Cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 1994. 106p.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 266p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 184p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Pontifícia- Programa de pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 246p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós- graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- LIMA, M.G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras**. Porto Alegre, 1990. 133p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós- graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LOVATO, P. S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. Porto Alegre, 2007. 180p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 573p.
- MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob ação conjunta de  $CO_2$  e íons cloretos**. Brasília-DF, 1996. 138 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto**. In: **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações**. Geraldo Isaia (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed .São Paulo: PINI,1997. 828p.
- NUNES, W. C. **Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós- graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.
- OLIVEIRA, M.J. E; ASSIS, C.S. **Estudo para o aproveitamento de concretos provenientes de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente**. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 41. 1999, Salvador. **Anais**. Salvador: Editora Ibracon, 1999.
- OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. **Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes**. Cement and Concrete Research, Vol.32, p. 179-185, 2002.
- PEREIRA, C. H. A. F.; FIGUEREDO, E. P.; E. J. P.; BAUER, E. **Avaliação da influência da adição de fibras sintéticas ao concreto quanto ao ingresso de íons cloreto**. Vetor, Rio Grande, vol 15 p.7-17, 2005.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, relação água/cimento, temperatura e tempo de cura**. 2001, 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2001.
- PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. L. A. **Performance of concrete with recycled aggregates**. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD 246 BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., p.425-434.
- PINTO, T. P. **Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil**. Situação atual. In reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil (Workshop), 1986, São Paulo. **Anais...**São Paulo, EPUSP / ANTAC.
- POLDER, R.B.; PEELLEN, W.H.A. **Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity**. Cement e Concrete Composites. v. 24, p. 247-435, 2002.

POON, C. S.; KOU, S. C. **Compressive strength, pore size distribution and chloride ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-fly ash.** Journal of Wuhan University of Technology Materials Science, Vol 21, N4, 2006.

PRADO, D. M. **Propriedades físicas e mecânicas de blocos estruturais produzidos com agregados reciclados de concreto.** 2006. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2006.

RILEM RECOMMENDATION. **Specification for concrete with recycled aggregates.** Materials and Structures. n.27, p.557-9, 1994.

RILEM, C. **Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete: TC 166 PCD.** Materials and Structures / Materiaux ET constructions, vol. 32, p. 178-179, Abr. 1999.

SANTOS R, BRANCO FA, DE BRITO J (2002) **Use of coarse recycled concrete aggregates in the production of new concrete In: Proceedings of congress structures 2002,** Lisbon, Portugal, pp 227–236 (in Portuguese).

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of masonry rubble. In: **Recycling of Demolished Concrete and Masonry,** RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E & FN SPON, London, p. 164-255, 1992.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research,** v. 34, p. 537-545, 2004.

SHI, C. et al. **Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implication on the Rapid Chloride Permeability Test Results.** **ACI Materials Journal,** v.95, n.4, 1998, p.389-394.

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

SILVA, P.F.A.; DJANIKIAN, J.G. **Durabilidade do concreto aparente.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. Anais... São Paulo, 1993. p.393-406.

SIQUEIRA, H.C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente.** 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado.** São Paulo: Editora PINI, 1998.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review.** FHWA Contract DTFH61- 97-R-00022, University of Toronto, Canadá, 1997, 31p.

TANG, L.; NILSSON, L. O. **Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field.** **ACI Materials Journal,** v.89, n.1, p. 49-53, 1992.

- TANGAVEL, K.; BALASUBRANVANUAN, T. M.; RENGASWAMY, N.S. **Fixing of chloride in concrete using admixtures**. The Indian concrete journal pp. 203-206.2000.
- TESSARI, R.; DAL MOLIN, D. C. C. **Otimização das qualidades do concreto armado frente à corrosão das armaduras- escolha do tipo de cimento**. 40º Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (REIBRAC). **Anais**. 1998.
- TECHNE: Revista de tecnologia da construção. São Paulo: Ed. PINI, ano 10, n. 55, out. 2001. 96 p.
- TU, T.; CHEN Y.; HWANG, C. **Properties of HPC with recycled aggregates**. Cement and Concrete Research, Vol. 36, p. 943-950, 2006.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469p.
- UNI. **Determination of Chloride Ion Penetration**, Italian Standard 79-28, Rome 1978.
- VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: ISO 14000**. São Paulo-SP: Editora Senac, 5ª ed.,195 p,2004.
- VAZQUEZ, E. **Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil**. In: Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na Construção civil, 4., 2001, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 11-21.
- VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre-RS, 2003. 151p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VILLAGRÁN – ZICCARDI, Y.A; ZEGA, C.J ; DI MAIO, A. A. **Chloride penetration and binding in recycled concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, v 20, n.6, pg. 449-455, June 2008.
- 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.221-232, March-April, 2000.
- WERLE, A.P; TROIAN,A.; ALCÂNTARA, J.; KULAKOWSKI; M.P.; KAZMIERCZAK, C.S. **Análise de metodologias utilizadas para a determinação da absorção de água de agregados reciclados**. In: ENTAC 2010 (no prelo).
- WERLE, A.P **Estudo da influência do agregado reciclado de concreto na carbonatação de concretos**. 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010 – Em desenvolvimento
- XIAO, J.; LI, J; ZHANG, Ch. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading**. Cement and Concrete Research, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.
- YANG, C.C; CHO, S.W; WANG, L.C **The relationship between pore structure and chloride diffusivity from ponding test in cement based materials**. Science Direct. Materials chemistry and physics 100, pg .203-210, december 2005.
- ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil**. São Paulo, 2000. Disponível em <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho\\_ind\\_ccil.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccil.htm)>. Acesso em: 25 de fev.2009.

ZORDAN, S. E. **Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas-SP, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.

## **APÊNDICES**

Tabela A1 - Carga total passante após 6 horas de ensaio – Agregado 18 MPa (a/c 0,85)

Treço	a/c ag	ABS (%)	%AG	%PM	Corrente (A)	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	Carga tota (Coulom	
T3/01	0,85	8,49	25	25	0,146	0,156	0,179	0,2	0,222	0,244	0,263	0,297	0,315	0,329	0,344	0,353	4	
T3/02	0,85	8,49	25	25	0,132	0,135	0,156	0,174	0,192	0,208	0,223	0,237	0,251	0,273	0,281	0,286	56	
T3/03	0,85	8,49	25	25	0,114	0,135	0,153	0,171	0,188	0,206	0,221	0,238	0,248	0,262	0,267	0,27	41	
T6/01	0,85	8,49	25	75	0,136	0,158	0,182	0,205	0,231	0,257	0,283	0,295	0,33	0,372	0,393	0,413	54	
T6/02	0,85	8,49	25	75	0,121	0,124	0,14	0,153	0,167	0,18	0,19	0,202	0,213	0,223	0,23	0,241	94	
T6/03	0,85	8,49	25	75	0,12	0,152	0,169	0,19	0,207	0,227	0,247	0,292	0,307	0,32	0,331	0,339	61	
T4/01	0,85	8,49	50	0	0,234	0,247	0,308	0,365	0,426	0,486	0,534	0,617	0,661	0,689	0,722	0,757	90	
T4/02	0,85	8,49	50	0	0,177	0,174	0,204	0,229	0,256	0,284	0,308	0,331	0,346	0,364	0,371	0,38	60	
T4/03	0,85	8,49	50	0	0,171	0,217	0,256	0,293	0,335	0,381	0,419	0,46	0,483	0,513	0,529	0,546	57	
T7/01	0,85	8,49	50	50	0,143	0,161	0,187	0,211	0,236	0,262	0,285	0,295	0,326	0,361	0,38	0,394	64	
T7/02	0,85	8,49	50	50	0,139	0,143	0,163	0,183	0,2	0,217	0,235	0,253	0,268	0,288	0,293	0,299	62	
T7/03	0,85	8,49	50	50	0,163	0,201	0,228	0,258	0,285	0,31	0,335	0,347	0,349	0,352	0,355	0,357	54	
T10/01	0,85	8,49	50	100	0,157	0,171	0,201	0,221	0,249	0,288	0,319	0,347	0,365	0,381	0,402	0,413	0,43	68
T10/02	0,85	8,49	50	100	0,164	0,16	0,18	0,198	0,215	0,233	0,249	0,266	0,274	0,282	0,285	0,287	0,289	68
T10/03	0,85	8,49	50	100	0,146	0,177	0,205	0,232	0,264	0,307	0,333	0,362	0,385	0,407	0,428	0,477	68	
T8/01	0,85	8,49	75	25	0,182	0,187	0,225	0,252	0,285	0,332	0,366	0,398	0,41	0,418	0,441	0,457	0,477	9
T8/02	0,85	8,49	75	25	0,204	0,184	0,213	0,329	0,265	0,296	0,323	0,345	0,366	0,378	0,387	0,393	0,406	90
T8/03	0,85	8,49	75	25	0,202	0,274	0,324	0,373	0,417	0,457	0,494	0,514	0,519	0,528	0,547	0,558	0,568	76
T11/01	0,85	8,49	75	75	0,243	0,239	0,294	0,331	0,379	0,444	0,491	0,52	0,532	0,549	0,578	0,618	113	
T11/02	0,85	8,49	75	75	0,182	0,195	0,231	0,259	0,287	0,316	0,345	0,377	0,395	0,414	0,429	0,446	0,467	97
T11/03	0,85	8,49	75	75	0,265	0,313	0,378	0,435	0,488	0,532	0,566	0,594	0,617	0,645	0,681	0,727	0,798	86
T9/01	0,85	8,49	100	0	0,239	0,254	0,309	0,345	0,398	0,47	0,516	0,553	0,571	0,596	0,644	0,667	0,697	100
T9/02	0,85	8,49	100	0	0,223	0,21	0,251	0,29	0,327	0,362	0,406	0,423	0,443	0,446	0,461	0,463	0,475	94
T9/03	0,85	8,49	100	0	0,217	0,292	0,339	0,388	0,425	0,458	0,481	0,5	0,517	0,54	0,559	0,581	0,611	83
T12/01	0,85	8,49	100	50	0,299	0,274	0,331	0,37	0,424	0,457	0,483	0,495	0,503	0,511	0,526	0,547	0,58	97
T12/02	0,85	8,49	100	50	0,223	0,211	0,261	0,297	0,337	0,378	0,365	0,439	0,455	0,464	0,472	0,481	0,493	95
T12/03	0,85	8,49	100	50	0,22	0,302	0,357	0,406	0,447	0,482	0,498	0,501	0,502	0,499	0,501	0,512	0,536	88
T15/01	0,85	8,49	100	100	0,281	0,258	0,317	0,36	0,419	0,463	0,497	0,517	0,524	0,532	0,549	0,571	0,606	110
T15/02	0,85	8,49	100	100	0,205	0,218	0,264	0,301	0,344	0,387	0,43	0,464	0,488	0,51	0,537	0,565	0,597	17
T15/03	0,85	8,49	100	100	0,231	0,336	0,4	0,456	0,5	0,533	0,549	0,56	0,571	0,582	0,609	0,647	0,775	20

Observações:

- 1) Q é a carga total passante;
- 2) I<sub>0</sub> representa a medida de corrente imediatamente após a aplicação da voltagem;
- 3) I<sub>t</sub> representa a medida de corrente após t minutos de aplicação da voltagem.

Tabela A 2 Carga total passante após 6 horas de ensaio – Agregado 37 MPa (a/c 0,56)

Traço	a/c ag	ABS (%)	%AG	%PM	Corrente (A)												Carga total C (Coulombs)	
					0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	
T14/01	0,56	6,07	25	0	0,138	0,143	0,163	0,176	0,194	0,208	0,223	0,237	0,25	0,262	0,273	0,281	0,288	4470,3
T14/02	0,56	6,07	25	0	0,124	0,13	0,148	0,165	0,18	0,195	0,208	0,222	0,236	0,247	0,257	0,267	0,275	5073,3
T14/03	0,56	6,07	25	0	0,129	0,154	0,176	0,198	0,218	0,239	0,255	0,273	0,284	0,294	0,3	0,304	0,308	5324,4
T17/01	0,56	6,07	25	50	0,152	0,156	0,182	0,197	0,219	0,235	0,253	0,269	0,284	0,298	0,31	0,32	0,326	4502,7
T17/02	0,56	6,07	25	50	0,12	0,127	0,144	0,16	0,174	0,188	0,202	0,216	0,228	0,241	0,252	0,261	0,271	6122,7
T17/03	0,56	6,07	25	50	0,147	0,188	0,216	0,245	0,272	0,299	0,324	0,344	0,365	0,375	0,381	0,388	0,404	7970,4
T20/01	0,56	6,07	25	100	0,247	0,234	0,273	0,309	0,346	0,379	0,41	0,435	0,45	0,46	0,466	0,472	0,481	7413,3
T20/02	0,56	6,07	25	100	0,204	0,2	0,236	0,266	0,297	0,325	0,351	0,373	0,391	0,405	0,415	0,426	0,435	9230,4
T20/03	0,56	6,07	25	100	0,199	0,27	0,321	0,366	0,409	0,446	0,472	0,491	0,512	0,534	0,558	0,587	0,625	6725,7
T18/01	0,56	6,07	50	25	0,182	0,177	0,202	0,226	0,251	0,273	0,295	0,315	0,331	0,34	0,344	0,344	0,345	4631,4
T18/02	0,56	6,07	50	25	0,128	0,132	0,147	0,161	0,175	0,189	0,202	0,213	0,226	0,235	0,243	0,249	0,254	5934,6
T18/03	0,56	6,07	50	25	0,155	0,196	0,223	0,249	0,274	0,296	0,32	0,331	0,335	0,34	0,343	0,349	0,355	6117,3
T21/01	0,56	6,07	50	75	0,19	0,185	0,21	0,234	0,257	0,277	0,296	0,314	0,323	0,333	0,338	0,341	0,353	5399,1
T21/02	0,56	6,07	50	75	0,157	0,155	0,18	0,2	0,218	0,236	0,251	0,266	0,28	0,29	0,298	0,306	0,31	5966,1
T21/03	0,56	6,07	50	75	0,148	0,18	0,199	0,218	0,235	0,26	0,284	0,318	0,342	0,363	0,38	0,394	0,405	5889,6
T19/01	0,56	6,07	75	0	0,158	0,161	0,186	0,21	0,234	0,255	0,279	0,301	0,315	0,329	0,34	0,344	0,356	4853,7
T19/02	0,56	6,07	75	0	0,13	0,133	0,153	0,171	0,187	0,204	0,22	0,234	0,247	0,26	0,269	0,276	0,281	5607,9
T19/03	0,56	6,07	75	0	0,135	0,173	0,199	0,226	0,247	0,27	0,286	0,3	0,31	0,319	0,33	0,337	0,346	6532,2
T22/01	0,56	6,07	75	50	0,217	0,203	0,234	0,261	0,287	0,309	0,33	0,344	0,358	0,364	0,366	0,371	0,373	5409
T22/02	0,56	6,07	75	50	0,154	0,154	0,177	0,195	0,21	0,231	0,245	0,257	0,268	0,281	0,291	0,295	0,302	7482,6
T22/03	0,56	6,07	75	50	0,192	0,253	0,292	0,331	0,365	0,392	0,415	0,422	0,418	0,421	0,416	0,418	0,416	7864,2
T25/01	0,56	6,07	75	100	0,25	0,232	0,269	0,304	0,338	0,366	0,394	0,407	0,42	0,427	0,433	0,439	0,446	6192,9
T25/02	0,56	6,07	75	100	0,17	0,172	0,198	0,219	0,238	0,256	0,276	0,295	0,313	0,327	0,338	0,343	0,347	8031,6
T25/03	0,56	6,07	75	100	0,219	0,283	0,316	0,344	0,373	0,4	0,423	0,437	0,436	0,432	0,438	0,451	0,495	8064
T23/01	0,56	6,07	100	25	0,286	0,247	0,289	0,323	0,357	0,387	0,41	0,423	0,427	0,423	0,417	0,412	0,408	6831,9
T23/02	0,56	6,07	100	25	0,192	0,187	0,217	0,246	0,272	0,298	0,323	0,346	0,363	0,374	0,381	0,386	0,387	9095,4
T23/03	0,56	6,07	100	25	0,238	0,317	0,373	0,422	0,461	0,492	0,508	0,498	0,477	0,467	0,451	0,45	0,45	8736,3
T26/01	0,56	6,07	100	75	0,31	0,265	0,311	0,351	0,389	0,42	0,446	0,459	0,462	0,459	0,453	0,443	0,435	7028,1
T26/02	0,56	6,07	100	75	0,21	0,203	0,233	0,255	0,279	0,301	0,323	0,349	0,361	0,372	0,375	0,374	0,373	9867,6
T26/03	0,56	6,07	100	75	0,246	0,302	0,349	0,39	0,431	0,47	0,51	0,544	0,573	0,597	0,624	0,655	0,702	6525,9

Observações:

- 1) Q é a carga total passante;
- 2) I<sub>0</sub> representa a medida de corrente imediatamente após a aplicação da voltagem;
- 3) I<sub>t</sub> representa a medida de corrente após t minutos de aplicação da voltagem.

Tabela A 3 - Carga total passante após 6 horas de ensaio – Agregado 50 MPa (0,43)

Traco	a/c ag	ABS (%)	%AG	%PM	Corrente (A)												Carga total C (Coulombs)	
					0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	
T3/01	0,85	8,49	25	25	0,146	0,156	0,179	0,2	0,222	0,244	0,263	0,269	0,297	0,315	0,329	0,344	0,353	4761
T3/02	0,85	8,49	25	25	0,132	0,135	0,156	0,174	0,192	0,208	0,223	0,237	0,251	0,264	0,273	0,281	0,286	5697,9
T3/03	0,85	8,49	25	25	0,114	0,135	0,153	0,171	0,188	0,206	0,221	0,238	0,248	0,255	0,262	0,267	0,27	4152,6
T6/01	0,85	8,49	25	75	0,136	0,158	0,182	0,205	0,231	0,257	0,283	0,295	0,33	0,351	0,372	0,393	0,413	5447,7
T6/02	0,85	8,49	25	75	0,121	0,124	0,14	0,153	0,167	0,18	0,19	0,202	0,213	0,223	0,23	0,237	0,241	9465,3
T6/03	0,85	8,49	25	75	0,12	0,152	0,169	0,19	0,207	0,227	0,247	0,273	0,292	0,307	0,32	0,331	0,339	6117,3
T4/01	0,85	8,49	50	0	0,234	0,247	0,308	0,365	0,426	0,486	0,534	0,55	0,617	0,661	0,689	0,722	0,757	9071,1
T4/02	0,85	8,49	50	0	0,177	0,174	0,204	0,229	0,256	0,284	0,308	0,331	0,346	0,355	0,364	0,371	0,38	6025,5
T4/03	0,85	8,49	50	0	0,171	0,217	0,256	0,293	0,335	0,381	0,419	0,46	0,483	0,499	0,513	0,529	0,546	5716,8
T7/01	0,85	8,49	50	50	0,143	0,161	0,187	0,211	0,236	0,262	0,285	0,295	0,326	0,346	0,361	0,38	0,394	6481,8
T7/02	0,85	8,49	50	50	0,139	0,143	0,163	0,183	0,2	0,217	0,235	0,253	0,268	0,279	0,288	0,293	0,299	6212,7
T7/03	0,85	8,49	50	50	0,163	0,201	0,228	0,258	0,285	0,31	0,335	0,347	0,349	0,352	0,35	0,355	0,357	5400,9
T10/01	0,85	8,49	50	100	0,157	0,171	0,201	0,221	0,249	0,288	0,319	0,347	0,365	0,381	0,402	0,413	0,43	6871,5
T10/02	0,85	8,49	50	100	0,164	0,16	0,18	0,198	0,215	0,233	0,249	0,266	0,274	0,282	0,285	0,287	0,289	6891,3
T10/03	0,85	8,49	50	100	0,146	0,177	0,205	0,232	0,264	0,307	0,333	0,362	0,385	0,407	0,428	0,452	0,477	6897,6
T8/01	0,85	8,49	75	25	0,182	0,187	0,225	0,252	0,285	0,332	0,366	0,398	0,41	0,418	0,441	0,457	0,477	9252
T8/02	0,85	8,49	75	25	0,204	0,184	0,213	0,329	0,265	0,296	0,323	0,345	0,366	0,378	0,387	0,393	0,406	9072,9
T8/03	0,85	8,49	75	25	0,202	0,274	0,324	0,373	0,417	0,457	0,494	0,514	0,519	0,528	0,532	0,547	0,558	7661,7
T11/01	0,85	8,49	75	75	0,243	0,239	0,294	0,331	0,379	0,444	0,491	0,52	0,532	0,549	0,578	0,59	0,618	11387,7
T11/02	0,85	8,49	75	75	0,182	0,195	0,231	0,259	0,287	0,316	0,345	0,377	0,395	0,414	0,429	0,446	0,467	9779,4
T11/03	0,85	8,49	75	75	0,265	0,313	0,378	0,435	0,488	0,532	0,566	0,594	0,617	0,645	0,681	0,727	0,798	8647,2
T9/01	0,85	8,49	100	0	0,239	0,254	0,309	0,345	0,398	0,47	0,516	0,553	0,571	0,596	0,644	0,667	0,697	10087,2
T9/02	0,85	8,49	100	0	0,223	0,21	0,251	0,29	0,327	0,362	0,406	0,423	0,443	0,446	0,461	0,463	0,475	9423,9
T9/03	0,85	8,49	100	0	0,217	0,292	0,339	0,388	0,425	0,458	0,481	0,5	0,517	0,54	0,559	0,581	0,611	8380,8
T12/01	0,85	8,49	100	50	0,299	0,274	0,331	0,37	0,424	0,457	0,483	0,495	0,503	0,511	0,526	0,547	0,58	9716,4
T12/02	0,85	8,49	100	50	0,223	0,211	0,261	0,297	0,337	0,378	0,365	0,439	0,455	0,464	0,472	0,481	0,493	9564,3
T12/03	0,85	8,49	100	50	0,22	0,302	0,357	0,406	0,447	0,482	0,498	0,501	0,502	0,499	0,501	0,512	0,536	8841,6
T15/01	0,85	8,49	100	100	0,281	0,258	0,317	0,36	0,419	0,463	0,497	0,517	0,524	0,532	0,549	0,571	0,606	11068,2
T15/02	0,85	8,49	100	100	0,205	0,218	0,264	0,301	0,344	0,387	0,43	0,464	0,488	0,51	0,537	0,565	0,597	1796,4
T15/03	0,85	8,49	100	100	0,231	0,336	0,4	0,456	0,5	0,533	0,549	0,56	0,571	0,582	0,609	0,647	0,775	2075,4

Observações:

- 1) Q é a carga total passante;
- 2) I<sub>0</sub> representa a medida de corrente imediatamente após a aplicação da voltagem;
- 3) I<sub>t</sub> representa a medida de corrente após t minutos de aplicação da voltagem.

Tabela A 4 - Resultados de resistência à compressão e resistência à tração diametral dos concretos

Traço	a/c ag	%AG	%PM	fck (MPa)	Média (MPa)	Desv.Pad (MPa)	CV (%)	ftD (MPa)	Média(Mpa)	Desv.Pad(MPa)	CV(%)
T24/01	REF	0	0	32.7	32.36	0.25	0.77	6.81	9.32	1.78	19.12
T24/02	REF	0	0	32.1				10.38			
T24/03	REF	0	0	32.3				10.77			
T28/01	0.43	25	25	30	32.70	2.03	6.21	11.76	9.95	1.50	15.07
T28/02	0.43	25	25	33.2				8.09			
T28/02	0.43	25	25	34.9				9.99			
T31/01	0.43	25	75	21.1	25.80	3.48	13.48	9.65	8.82	1.11	12.61
T31/02	0.43	25	75	26.9				7.25			
T31/02	0.43	25	75	29.4				9.57			
T29/01	0.43	50	0	34.3	33.50	1.20	3.59	9.67	10.44	0.58	5.59
T29/02	0.43	50	0	31.8				11.08			
T29/01	0.43	50	0	34.4				10.58			
T32/01	0.43	50	50	33.5	34.33	0.85	2.48	9.09	8.76	0.32	3.70
T32/02	0.43	50	50	35.5				8.32			
T32/02	0.43	50	50	34				8.87			
T35/01	0.43	50	100	35.5	33.83	2.79	8.25	9.8	9.70	0.98	10.13
T35/02	0.43	50	100	36.1				8.45			
T35/01	0.43	50	100	29.9				10.85			
T33/01	0.43	75	25	28.3	28.23	0.25	0.88	8.17	7.94	0.85	10.68
T33/02	0.43	75	25	27.9				6.81			
T33/02	0.43	75	25	28.5				8.85			
T36/01	0.43	75	75	27.8	25.67	3.67	14.31	10.72	9.64	0.80	8.33
T36/02	0.43	75	75	20.5				8.8			
T36/01	0.43	75	75	28.7				9.39			
T34/01	0.43	100	0	32.5	33.23	1.24	3.73	7.41	8.25	1.03	12.53
T34/02	0.43	100	0	29.5				7.64			
T34/01	0.43	100	0	31.4				9.71			
T37/01	0.43	100	50	33.9	32.60	1.50	4.60	9.24	8.46	0.82	9.74
T37/02	0.43	100	50	30.5				8.82			
T37/01	0.43	100	50	33.4				7.32			
T38/01	0.43	100	100	27.8	28.83	1.19	4.13	9.72	9.44	0.76	8.06
T38/02	0.43	100	100	30.5				8.4			
T38/01	0.43	100	100	28.2				10.2			
T14/01	0.56	25	0	27.1	29.50	1.70	5.78	9.71	8.68	0.90	10.35
T14/02	0.56	25	0	30.9				7.52			
T14/01	0.56	25	0	30.5				8.81			
T17/01	0.56	25	50	37.3	35.40	1.85	5.21	11.51	10.70	0.86	8.04
T17/02	0.56	25	50	32.9				11.09			
T17/01	0.56	25	50	36				9.51			
T20/01	0.56	25	100	29.7	32.67	2.12	6.48	9.85	10.01	0.80	8.03
T20/02	0.56	25	100	34.5				11.07			
T20/01	0.56	25	100	33.8				9.12			
T18/01	0.56	50	25	32.3	31.57	0.77	2.44	10.08	10.82	0.52	4.84
T18/02	0.56	50	25	31.9				11.19			
T18/01	0.56	50	25	30.5				11.19			
T21/01	0.56	50	75	38	33.67	3.10	9.22	10.45	10.07	0.94	9.36
T21/02	0.56	50	75	30.9				10.98			
T21/01	0.56	50	75	32.1				8.77			
T19/01	0.56	75	0	31.4	26.74	1.96	7.33	7.78	9.04	1.01	11.16
T19/02	0.56	75	0	32.9				10.25			
T19/01	0.56	75	0	28.2				9.09			
T22/01	0.56	75	50	30	29.30	0.62	2.10	9.29	9.33	0.64	6.88

Tabela A 5 - Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,43

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T24/01	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T24/02	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T24/03	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T28/01	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T28/02	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T28/02	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T31/01	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T31/02	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T31/02	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T29/01	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T29/02	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T29/01	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T32/01	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T32/02	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T32/02	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T35/01	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T35/02	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T35/01	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T33/01	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T33/02	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T33/02	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T36/01	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T36/02	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T36/01	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T34/01	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T34/02	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T34/01	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T37/01	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T37/02	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T37/01	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T38/01	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%
T38/02	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%
T38/01	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%

Tabela A 6 - Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,56

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T14/01	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T14/02	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T14/01	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T17/01	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T17/02	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T17/01	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T20/01	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T20/02	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T20/01	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T18/01	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T18/02	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T18/01	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T21/01	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T21/02	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T21/01	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T19/01	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T19/02	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T19/01	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T22/01	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T22/02	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T22/01	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T25/01	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T25/02	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T25/01	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T23/01	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T23/02	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T23/01	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T26/01	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%
T26/02	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%
T26/01	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%

Tabela A 7- Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,85

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T3/01	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T3/02	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T3/01	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T6/01	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T6/02	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T6/01	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T4/01	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T4/02	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T4/01	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T7/01	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T7/02	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T7/01	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T10/01	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T10/02	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T10/01	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T8/01	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T8/02	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T8/01	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T11/01	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T11/02	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T11/01	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T9/01	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T9/02	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T9/01	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T12/01	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T12/02	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T12/01	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T15/01	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%
T15/02	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%
T15/01	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%

**Tabela A 8 - Resultados de absorção de cloretos por capilaridade**

Traço	a/c ag	fc ag	ABS (%)	TAG (%)	TPM(%)	ACF	ABCL (g/cm <sup>2</sup> )
T24/01	REF	200	2,19	0	0	0,64	0,64
T24/02	REF	200	2,19	0	0	0,64	0,74
T28/01	0,43	50	5,24	25	25	0,65	0,68
T28/02	0,43	50	5,24	25	25	0,65	0,75
T31/01	0,43	50	5,24	25	75	0,64	0,81
T31/02	0,43	50	5,24	25	75	0,64	0,74
T29/01	0,43	50	5,24	50	0	0,74	0,75
T29/02	0,43	50	5,24	50	0	0,74	0,79
T32/01	0,43	50	5,24	50	50	0,67	0,76
T32/02	0,43	50	5,24	50	50	0,67	0,75
T35/01	0,43	50	5,24	50	100	0,62	0,83
T35/02	0,43	50	5,24	50	100	0,62	0,81
T33/01	0,43	50	5,24	75	25	0,66	0,86
T33/02	0,43	50	5,24	75	25	0,66	0,83
T36/01	0,43	50	5,24	75	75	0,70	0,89
T36/02	0,43	50	5,24	75	75	0,70	0,86
T34/01	0,43	50	5,24	100	0	0,81	0,83
T34/02	0,43	50	5,24	100	0	0,81	0,84
T37/01	0,43	50	5,24	100	50	0,73	0,92
T37/02	0,43	50	5,24	100	50	0,73	0,87
T38/01	0,43	50	5,24	100	100	0,63	1,01
T38/02	0,43	50	5,24	100	100	0,63	0,96
T14/01	0,56	37	6,07	25	0	0,67	0,62
T14/02	0,56	37	6,07	25	0	0,67	0,61
T17/01	0,56	37	6,07	25	50	0,67	0,61
T17/02	0,56	37	6,07	25	50	0,67	0,61
T20/01	0,56	37	6,07	25	100	0,64	0,84
T20/02	0,56	37	6,07	25	100	0,64	0,89
T18/01	0,56	37	6,07	50	25	0,71	0,69
T18/02	0,56	37	6,07	50	25	0,71	0,68
T21/01	0,56	37	6,07	50	75	0,65	0,73
T21/02	0,56	37	6,07	50	75	0,65	0,77
T19/01	0,56	37	6,07	75	0	0,83	0,72
T19/02	0,56	37	6,07	75	0	0,83	0,68
T22/01	0,56	37	6,07	75	50	0,71	0,77
T22/02	0,56	37	6,07	75	50	0,71	0,83
T25/01	0,56	37	6,07	75	100	0,64	0,91
T25/02	0,56	37	6,07	75	100	0,64	0,96
T23/01	0,56	37	6,07	100	25	0,78	0,86
T23/02	0,56	37	6,07	100	25	0,78	0,95
T26/01	0,56	37	6,07	100	75	0,67	0,88
T26/02	0,56	37	6,07	100	75	0,67	0,91
T3/01	0,85	18	8,49	25	25	0,64	0,80
T3/02	0,85	18	8,49	25	25	0,64	0,72
T6/01	0,85	18	8,49	25	75	0,64	0,77
T6/02	0,85	18	8,49	25	75	0,64	0,78
T4/01	0,85	18	8,49	50	0	0,73	0,87
T4/02	0,85	18	8,49	50	0	0,73	0,88
T7/01	0,85	18	8,49	50	50	0,64	0,77
T7/02	0,85	18	8,49	50	50	0,64	0,77
T10/01	0,85	18	8,49	50	100	0,59	0,79
T10/02	0,85	18	8,49	50	100	0,59	0,80
T8/01	0,85	18	8,49	75	25	0,73	0,87
T8/02	0,85	18	8,49	75	25	0,73	0,84
T11/01	0,85	18	8,49	75	75	0,64	0,90
T11/02	0,85	18	8,49	75	75	0,64	0,89
T9/01	0,85	18	8,49	100	0	0,86	0,92
T9/02	0,85	18	8,49	100	0	0,86	0,89
T12/01	0,85	18	8,49	100	50	0,72	0,96
T12/02	0,85	18	8,49	100	50	0,72	0,97
T15/01	0,85	18	8,49	100	100	0,55	0,87
T15/02	0,85	18	8,49	100	100	0,55	0,91