

ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUO DE  
CORTE DE ROCHA E DE BLOCOS CERÂMICOS MOÍDOS

**CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Dezembro – 2008

ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUO DE  
CORTE DE ROCHA E DE BLOCOS CERÂMICOS MOÍDOS

**CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para a  
obtenção de título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

Co-orientador: Prof. Guilherme Chagas Cordeiro

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Dezembro – 2008

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**09/2009**

Rocha, Camila Aparecida Abelha

Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos / Camila Aparecida Abelha Rocha. – Campos dos Goytacazes, 2008.

xiv, 107 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2008.

Orientador: Dylmar Penteado Dias.

Co-orientador: Guilherme Chagas Cordeiro.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 92-100.

1. Adições minerais 2. Resíduo de corte de rocha 3. Resíduo de blocos cerâmicos moídos 4. Concretos I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.1834

ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUO DE  
CORTE DE ROCHA E DE BLOCOS CERÂMICOS MOÍDOS

**CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para a  
obtenção de título de Mestre em  
Engenharia Civil.

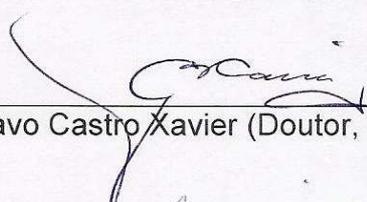
Aprovada em 8 de dezembro de 2008.

Comissão Examinadora:



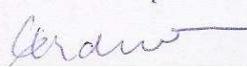
---

Prof. Conrado de Souza Rodrigues (Doutor, Engenharia Civil) – CEFET-MG



---

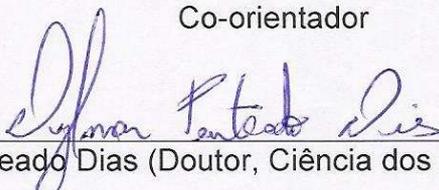
Prof. Gustavo Castro Xavier (Doutor, Engenharia Civil) – LECIV/UENF



---

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro (Doutor, Engenharia Civil) – LECIV/UENF

Co-orientador



---

Prof. Dylmar Penteado Dias (Doutor, Ciência dos Materiais) – LECIV/UENF

Orientador

## Dedicatória

*Dedico a todos que, de alguma forma, ajudaram  
na realização desta dissertação*

## Agradecimentos

A UENF, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Projeto CAPES/PROCAD, pelo auxílio financeiro e por permitir a realização do mestrado sanduíche.

À COPPE/UFRJ, na pessoa do professor Romildo Toledo, por permitir a realização de vários ensaios no LABEST.

À Holcim, pela doação do cimento.

A todos os professores do LECIV/UENF, em especial, ao professor Sérgio Luís, pelo apoio buscando superar todos os obstáculos encontrados durante o mestrado.

Ao Prof. Jean Marie pela orientação durante o projeto de dissertação, sua partida fez muita falta.

Ao Prof. Dylmar pela orientação, confiança e apoio durante o Mestrado.

Ao Prof. Guilherme, por ter me acolhido na UFRJ, pelas sugestões, muito bem vindas, durante todo o desenvolvimento da dissertação, e pelas revisões minuciosas. Sem sua ajuda eu não teria conseguido.

Ao bolsista Rafael por cuidar com muito cuidado e carinho dos meus corpos-de-prova enquanto eu estava na COPPE/UFRJ.

Aos técnicos da LABEST/UFRJ Flávio, Clodoaldo, Júlio pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos colegas que fiz na COPPE, sempre dispostos a ajudar, Cíntia, Mônica, João, Ederli, Lourdes, Maria Rita, Gadea, Reila, e Vivian.

Aos técnicos do LECIV/UENF Milton, André e Vanuzia, pelo auxílio durante os anos que passei na Universidade, desde os tempos de graduação.

Aos colegas de mestrado e de laboratório Marcos Vinícios, Leonardo Pedroti, Carol Espinosa, Aline Dias, Aliny Tebaldi, Juscelina, Gustavo Savaris e Cristiano Miller.

Um agradecimento especial a amiga, que fiz durante o mestrado, Juliana, confidente das vitórias e das dificuldades.

Aos meus amigos, Gustavo Luna e Reginaldo, que mesmo sem pertencerem a UENF ou algum grupo de pesquisa me ajudaram nos trabalhos mais pesados como as concretagens.

Ao meu namorado Antonio Júnior, que desde quando entrou em minha vida deu um gás a mais no desenvolvimento da dissertação, participando de quase todas as concretagens e muito mais, mesmo sendo nos finais de semana, feriados ou horário de almoço. Antonio, esta vitória também é sua.

À minha amiga e *roommate* Érica que me acompanhou desde os tempos do Ensino Médio até os anos do Mestrado.

Aos meus pais Carlos Alberto e Sandra, meu irmão Saulo, e toda a minha família, pelo apoio.

Aos meus tios Cremio e Marciane e minhas primas Polyana e Maryana, por me acolherem em sua casa todas as vezes que precisava ficar no Rio de Janeiro.

À minha família emprestada Antonio, Laurinda e Ana Laura, por me acolherem em sua casa nos meses finais do Mestrado.

Ao meu amigo Sandro, por me cobrir a minha ausência todas as vezes que precisava ir à Universidade.

Por fim para não esquecer ninguém, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Quando as coisas não acontecem do jeito que a gente quer,  
é porque irão acontecer melhor do que a gente pensa.”

*Autor Desconhecido*

## Índice

Lista de Figuras.....	IV
Lista de Tabelas .....	VIII
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	XI
Resumo.....	XIII
Abstract .....	XIV
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos e justificativas .....	7
1.2. Organização da dissertação .....	8
2. Efeito de adições minerais nas propriedades do concreto.....	9
2.1. Concreto no estado fresco.....	10
2.1.1. Aspectos reológicos e consumo de água.....	10
2.2. Concreto no estado endurecido.....	13
2.2.1. Resistência à compressão .....	13
2.2.2. Resistência à tração.....	15
2.3. Parâmetros físicos e de durabilidade.....	15
2.3.1. Absorção de água e permeabilidade.....	16
2.3.2. Ataque por íons cloreto .....	20
2.3.3. Ataque por sulfatos .....	24
3. Programa experimental.....	28
3.1. Materiais.....	28
3.1.1. Resíduo de corte de rochas (RCR).....	28
3.1.2. Resíduo de blocos cerâmicos moídos (RBC) .....	32
3.1.3. Cimento.....	35
3.1.4. Superplastificante.....	36
3.1.5. Outros materiais.....	37
3.2. Métodos.....	39
3.2.1. Dosagem dos concretos .....	39
3.2.2. Produção e cura dos concretos .....	40
3.2.3. Ensaio mecânicos .....	44
3.2.3.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	44

3.2.3.2.	Resistência à tração .....	45
3.2.3.2.1.	Resistência à tração na flexão .....	45
3.2.3.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	46
3.2.4.	Ensaio físicos e de durabilidade.....	47
3.2.4.1.	Absorção por capilaridade.....	47
3.2.4.2.	Absorção por imersão .....	48
3.2.4.3.	Ataque por sulfato de magnésio.....	50
3.2.4.4.	Penetração acelerada de íons cloreto .....	52
3.2.4.5.	Ensaio de permeabilidade a gás .....	53
3.3.	Análise estatística dos resultados experimentais .....	56
4.	Resultados e discussão .....	57
4.1.	Consistência dos concretos.....	57
4.1.1.	Concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água .....	59
4.1.2.	Concretos com correção do abatimento com superplastificante.....	59
4.2.	Propriedades no estado endurecido dos concretos com correção do abatimento com água.....	61
4.2.1.	Ensaio físicos e de durabilidade.....	61
4.2.1.1.	Absorção total, índice de vazios e massa específica real .....	61
4.2.1.2.	Absorção por sucção capilar e absorvidade .....	63
4.2.1.3.	Permeabilidade a gás.....	68
4.2.1.4.	Penetração acelerada de íons cloreto .....	69
4.2.1.5.	Ataque por sulfato de magnésio.....	71
4.2.2.	Ensaio mecânicos .....	76
4.2.2.1.	Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	76
4.2.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão a quatro pontos.....	82
4.3.	Concretos com correção do abatimento com superplastificante .....	84
4.3.1.	Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	84
4.3.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	88
5.	Considerações finais.....	89
5.1.	Conclusões.....	89
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	91

6. Referências Bibliográficas.....	92
Anexo A: Análise de Variância (ANOVA) .....	101

## Lista de Figuras

Figura 1 - Resíduos acumulados no pátio de uma cerâmica. ....	4
Figura 2 – (a) Corte dos blocos de rocha com disco diamantado; (b) resíduo carregado pela água.....	5
Figura 3 – (a) Resíduo sólido do corte de rochas em tanque de decantação; (b) em cava.....	6
Figura 4 - Esquema da corrosão por “pites” devido à atuação dos íons cloreto (Thompson et al., 1988) .....	22
Figura 5 - Diagrama mostrando o mecanismo de expansão de argamassas e concretos devido à formação da etringita secundária (Gonçalves, 2005). ....	25
Figura 6 – Vista externa da Serraria Olho de Pombo, localizada no Município de Santo Antônio de Pádua - RJ .....	29
Figura 7 – Beneficiamento do resíduo de corte de rocha (RCR): (a) secagem ao ar livre; (b) secagem em estufa.....	29
Figura 8 - Resíduo de corte de rocha (RCR).....	30
Figura 9 - Distribuição granulométrica do RCR após moagem. ....	31
Figura 10 – Difrátograma de raios X do resíduo de corte de rocha (RCR).....	31
Figura 11 – A.C. Cerâmica.....	32
Figura 12 - Cerâmica União .....	32
Figura 13 – RBC sendo cominuído no britador de mandíbulas.....	33
Figura 14 - Aspecto do RBC após britagem.....	33
Figura 15 – (a) Moinho de bolas e (b) detalhe do RBC com a carga moedora. ....	33
Figura 16 - Resíduo de blocos cerâmicos moídos (RBC). ....	34
Figura 17 - Distribuição granulométrica do RBC e do RCR, após moagem.....	34
Figura 18 – Difrátograma de raios X do resíduo de bloco cerâmico moído (RBC).....	35
Figura 19 – Adsorção das moléculas de dispersante sobre a superfície do cimento (Fomagini, 2005). ....	37
Figura 20 – Misturador planetário.....	41
Figura 21 – Etapas da produção dos concretos.....	42
Figura 22 – Adensamento dos concretos em mesa vibratória.....	43
Figura 23 – Tanque de cura com corpos-de-prova e água saturada com cal. ....	43

Figura 24 – (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) corpo-de-prova com transdutores elétricos. ....	44
Figura 25 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão. ....	46
Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	47
Figura 27 – Ensaio de absorção por capilaridade. ....	48
Figura 28 – Ensaio de absorção por imersão. ....	49
Figura 29 – Configuração do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto. ....	53
Figura 30 – Permeâmetro a gás. ....	55
Figura 31 – Corpo-de-prova, para o ensaio de permeabilidade a gás, encaixado no anel de borracha de silicone. ....	55
Figura 32 – Abatimento de tronco de cone dos concretos: (a) CREF, (b) CRCR, (c) CRBC e (d) CRCR/RBC. ....	58
Figura 33 – Abatimento de tronco de cone dos concretos corrigidos com superplastificante: (a) CRCR, (b) CRBC e (c) CRCR/RBC. ....	60
Figura 34 – Absorção por imersão dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água. ....	61
Figura 35 – Índice de vazios dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água. ....	62
Figura 36 – Massa específica real dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água. ....	63
Figura 37 – Absorção por capilaridade dos concretos com correção do abatimento com água após 72 horas e após 1.416 horas. ....	64
Figura 38 – Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo (Gonçalves, 2005). ....	65
Figura 39 – Curvas típicas de ganho acumulado de massa de água em função da raiz quadrada do tempo dos concretos dos concretos com correção do abatimento com água. ....	66
Figura 40 – Absortividade dos concretos com correção do abatimento com água (a) estágio 1 e (b) estágio 2. ....	67
Figura 41 – Permeabilidade a gás de nitrogênio para os concretos com correção do abatimento com água. ....	69

Figura 42 – Penetração acelerada de íons cloreto para os concretos com correção do abatimento com água.....	70
Figura 43 – Difratoograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 28 dias.....	73
Figura 44 – Difratoograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 148 dias.....	73
Figura 45 – Difratoograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 148 dias e 120 dias de exposição ao sulfato de magnésio. ....	74
Figura 46 – Difratoograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício, com idade de 28 dias.....	75
Figura 47 – Difratoograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício, com idade de 148 dias. ....	75
Figura 48 – Difratoograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício com idade de 148 dias e 120 dias de exposição ao sulfato de magnésio.....	76
Figura 49 – Resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone, em função da idade. ....	77
Figura 50 – Curvas tensão versus deformação dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, aos 42 dias.....	78
Figura 51 – Curvas tensão versus deformação dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, aos 170 dias.....	79
Figura 52 – Módulo de elasticidade dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, em função da idade.....	80
Figura 53 – Resistência à tração por compressão diametral aos 42 dias dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.....	82
Figura 54 – Resistência à tração na flexão aos 60 dias dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água. ....	83
Figura 55 – Resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com superplastificante, aos 42 e 170 dias. ....	85

Figura 56 – Curvas tensão versus deformação dos concretos com correção do abatimento com superplastificante superplastificante, aos 42 dias. ....	86
Figura 57 – Módulo de elasticidade dos concretos com correção do abatimento com superplastificante, aos 42 dias. ....	87
Figura 58 – Resistência à tração por compressão diametral, aos 42 dias dos concretos com correção do abatimento de tronco de cone com superplastificante. ....	88

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação, medidas, aplicação e condições para adensamento de concretos frescos – desconsiderando o uso de aditivos (Petrucci, 1978). .....	13
Tabela 2 - Composição química em termos de óxidos do RCR, % em massa. ....	30
Tabela 3 - Composição química em termos de óxidos do RBC, % em massa.....	35
Tabela 4 - Composição química, em termos de óxidos do cimento Portland.....	36
Tabela 5 – Características do superplastificante.....	37
Tabela 6 – Características granulométricas e física da areia.....	38
Tabela 7 – Características granulométricas e física da brita.....	38
Tabela 8 - Resumo do programa experimental.....	39
Tabela 9 - Composição dos concretos.....	40
Tabela 10 - Ordem de colocação e tempos de mistura dos materiais no misturador.....	41
Tabela 11 - Classificação da penetração de íons cloreto com base na carga total passante (ASTM C 1202, 1997).....	52
Tabela 12 – Abatimento do tronco de cone dos concretos CREF, CRCR, CRBC e CRBC/CRBC.....	57
Tabela 13 – Abatimento do tronco de cone e relação água/material cimentício dos concretos com correção com água.....	59
Tabela 14 – Abatimento do tronco de cone e quantidade de superplastificante utilizada.....	60
Tabela 15 - Resistência à tração na flexão dos concretos na solução de referência (ftr), submetido ao ataque por sulfato (fts) e o dano de resistência à tração (DRT).....	72
Tabela 16 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de absorção por capilaridade do concreto de referência e com os concretos com resíduos.....	101
Tabela 17 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey.....	101
Tabela 18 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.....	101
Tabela 19 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.....	102

Tabela 20 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água. ....	102
Tabela 21 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com água em função da idade. ....	102
Tabela 22 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.....	103
Tabela 23 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água. ....	103
Tabela 24 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água. ....	103
Tabela 25 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.....	104
Tabela 26 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água. ....	104
Tabela 27 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração na flexão à 4 pontos do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.....	104
Tabela 28 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água. ....	105
Tabela 29 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos com correção do abatimento com superplastificante. ....	105
Tabela 30 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante. ....	105
Tabela 31 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante. ....	106
Tabela 32 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com superplastificante em função da idade. ....	106

Tabela 33 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com superplastificante.....	106
Tabela 34 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante. ....	107
Tabela 35 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência e com os concretos com resíduos e com correção do abatimento com superplastificante. ....	107
Tabela 36 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante. ....	107

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>ABNT</i>	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
<i>ACI</i>	<i>American Concrete Institute</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>C</i>	<i>Coulomb</i>
<i>C<sub>3</sub>A</i>	<i>Aluminato tricálcico</i>
<i>C<sub>3</sub>S</i>	<i>Silicato Tricálcico</i>
<i>C<sub>4</sub>AF</i>	<i>Ferroaluminato tetracálcico</i>
<i>CETEM</i>	<i>Centro de Tecnologia Mineral</i>
<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>Metano</i>
<i>Cl</i>	<i>Cloro</i>
<i>CO</i>	<i>Monóxido de carbono</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>Dióxido de carbono ou gás carbônico</i>
<i>COPPE</i>	<i>Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da UFRJ</i>
<i>CRBC</i>	<i>Concreto com substituição de 20% da massa original de cimento Portland substituída por RBC.</i>
<i>CRCR</i>	<i>Concreto com adição de 10% de RCR sobre a massa de cimento Portland</i>
<i>CRCR/RBC</i>	<i>Concreto com substituição de 20% da massa original de cimento Portland pelo RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício (cimento + RBC)</i>
<i>CREF</i>	<i>Concreto de referência</i>
<i>D<sub>50</sub></i>	<i>Tamanho abaixo do qual se encontra 50% da massa de material</i>
<i>DRT</i>	<i>Dano na resistência à tração</i>
<i>EDX</i>	<i>Análise química por fluorescência de raios X de energia dispersiva</i>
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Óxido de ferro III ou óxido férrico</i>
<i>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i>	<i>Magnetita</i>
<i>FeCl<sub>2</sub></i>	<i>Cloreto ferroso</i>
<i>GJ</i>	<i>GigaJoule</i>
<i>Gt</i>	<i>Gigatonelada</i>

<i>kg</i>	<i>Quilograma</i>
<i>kN</i>	<i>Quilo-Newton</i>
<i>LECIV</i>	<i>Laboratório de Engenharia Civil da UENF</i>
<i>MgSO<sub>4</sub></i>	<i>Sulfato de magnésio</i>
<i>MPa</i>	<i>MegaPascal</i>
<i>NaCl</i>	<i>Cloreto de sódio</i>
<i>NaOH</i>	<i>Hidróxido de sódio</i>
<i>NBR</i>	<i>Norma Brasileira</i>
<i>NO<sub>2</sub></i>	<i>Dióxido nítrico</i>
<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>Óxidos de nitrogênio</i>
<i>O<sub>2</sub></i>	<i>Oxigênio</i>
<i>pH</i>	<i>Potencial hidrogeniônico</i>
<i>PROCAD</i>	<i>Projeto de Cooperação Acadêmica</i>
<i>RBC</i>	<i>Resíduo de bloco cerâmico</i>
<i>RCR</i>	<i>Resíduo de corte de rocha</i>
<i>RETECMIN/RJ</i>	<i>Rede Cooperativa de Pesquisa e Uso de Bens Minerais Destinados à Construção Civil do Rio de Janeiro</i>
<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Dióxido de silício (sílica)</i>
<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>Dióxido de enxofre</i>
<i>t</i>	<i>Tonelada</i>
<i>UEFS</i>	<i>Universidade Estadual de Feira de Santana</i>
<i>UENF</i>	<i>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro</i>
<i>UFBA</i>	<i>Universidade Federal da Bahia</i>
<i>UFRJ</i>	<i>Universidade Federal do Rio de Janeiro</i>
<i>V</i>	<i>Volts</i>
<i>μm</i>	<i>Micrometro</i>

## ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUO DE CORTE DE ROCHA E DE BLOCOS CERÂMICOS MOÍDOS

### Resumo

A disposição final de resíduos industriais é um problema que se acentuou nos últimos anos, assim como o aumento da produção de cimento, que libera gases nocivos durante sua fabricação. Nesta dissertação avaliou-se a potencialidade de utilização de dois resíduos industriais (resíduos do corte de rochas, RCR, e de blocos cerâmicos, RBC) como adições minerais com características de filer e pozolana, respectivamente, na fabricação de concretos de resistência convencional (25 MPa). A avaliação foi conduzida através da comparação de propriedades mecânicas, físicas e algumas características associadas à durabilidade de quatro traços, a saber: concreto de referência com materiais convencionais; concreto com substituição de 20% da massa de cimento pelo RBC; concreto com adição de 10% de RCR em relação à massa de cimento; e concreto com 20% de substituição da massa de cimento pelo RBC e adição de 10% de RCR em relação à massa de material cimentício (cimento e RBC). O estudo foi dividido em duas partes. A primeira etapa consistiu na caracterização física, mecânica e de durabilidade de concretos com adição de resíduos e diferentes relações água/material cimentício, de modo a obter uma trabalhabilidade constante dos concretos. A segunda etapa, por sua vez, consistiu na caracterização mecânica de concretos com adição de resíduos e relação água/material cimentício constante, mantendo-se igual consistência com uso de superplastificante. Os resultados indicaram que é possível a produção de concretos com resistência convencional a partir do RBC e do RCR. Os concretos com relação água/material cimentício modificada, apresentaram redução das propriedades mecânicas e de alguns parâmetros físicos e de durabilidade em relação ao concreto de referência. Já os concretos com emprego de superplastificante (segunda etapa) não apresentaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas, em relação ao concreto de referência, exceto para o concreto com utilização do RCR e RBC que apresentou melhora nas propriedades mecânicas.

## STUDY OF THE CONCRETES CONTAINING MINERAL ADMIXTURES OF CUT-ROCKS AND GROUND CERAMIC BRICKS BY-PRODUCTS

### **Abstract**

In the last years, the disposal of the industrial by-products is a problem that is increasing, as well as the increase of the cement production, which generates green house gas emissions during its fabrication. This work aims to evaluate the potential of industrial by-products (extracted from cut-rocks, RCR, and ground ceramics bricks, RBC) as mineral admixtures, with filler and pozzolanic characteristics, in concretes with conventional strength (25 MPa). The evaluation was conducted by comparison of the mechanical, physical and durability properties of the four mixtures, namely: reference concrete with conventional materials; concrete with replacement of 20wt% cement mass by RBC; and concrete with 10wt% RCR related to cement mass; and concrete replacement of 20wt% cement mass by RBC and addition of 10wt% RCR related to cementitious material (cement plus RBC). This study was carried out in two steps. The first consisted on physical, mechanical and durability characterization of the concretes with the use of by-products and different water/cementitious material ratios, keeping the concrete workability fixed. The second consisted on the mechanical characterization of the concretes with by-products and constant water/cementitious material ratios (same as the first step), but the concrete workability was maintained fixed by the use of superplasticizers. The results indicate that it is possible to produce concretes with conventional strength with RBC and/or RCR. Concretes with superplasticizer had not presented significant difference on the mechanical properties compare to the reference one, excepted by the concrete with utilization of RCR and RBC that presented increase on the mechanical properties.

## 1. Introdução

O concreto é, de longe, o material manufaturado (entre os de construção ou não) mais utilizado no planeta, com consumo cerca de dez vezes maior que o do aço e que representa o dobro de todos os outros materiais de construção somados. A elevada resistência à compressão, aliada a fatores como custo relativamente baixo, versatilidade de formas e rapidez na construção, garante o uso do concreto em aplicações diversificadas como edificações, pontes, viadutos, túneis, barragens e pavimentos. Estas propriedades conferem ao concreto o segundo lugar entre os materiais mais consumidos pela humanidade, somente perdendo para a água (Isaia, 2005).

O concreto tem como seu principal material constituinte o cimento Portland. Em 2006 foram produzidas cerca de 2,4 bilhões de toneladas de cimento Portland no mundo (Oficemen, 2006). O Brasil produziu cerca de 36,7 milhões de toneladas de cimento Portland, em 2005, e ocupou o 10º lugar, com 1,71% da produção mundial. Já em 2007 a produção chegou a cerca de 46,4 milhões de toneladas (SNIC – Press Kit, 2007).

A indústria do cimento Portland é caracterizada por intenso consumo de energia e por liberar para atmosfera gases nocivos como CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, além de compostos orgânicos voláteis e odores (Mehta, 2002). De acordo com Malhotra (2002), o cimento consome cerca de 5 GJ de energia e libera, aproximadamente, 680 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer, quantidade que corresponde a cerca de 5 a 8% do total de CO<sub>2</sub> emitido anualmente no mundo pela atividade industrial. Deve-se ressaltar que o CO<sub>2</sub> é um gás essencial na manutenção da temperatura do planeta; porém, a emissão em grandes quantidades intensifica o efeito estufa e aumenta a retenção de calor que o planeta deveria refletir a fim de manter o seu equilíbrio térmico.

Destaca-se, ainda, que cada tonelada de cimento requer 1,65 t de matéria-prima, ou seja, prospecção anual de 2,9 Gt de matéria-prima, somada a mineração de 12,5 Gt de agregados para a confecção de concretos (Isaia, 2005). Estes valores mostram a magnitude do consumo de materiais para a confecção de concretos, dados que evidenciam o intenso uso de recursos naturais não-renováveis.

Em países em desenvolvimento, caso do Brasil, as necessidades de habitação e de infra-estrutura são de tal ordem que nenhum outro material poderá, por um grande período de tempo, substituir o concreto. Logo, no setor da construção civil diversas atitudes estão sendo tomadas para diminuir o impacto ambiental que a prospecção dos materiais, o consumo de energia e os gases liberados na atmosfera podem ocasionar em prejuízo ao meio ambiente. Dentre as várias alternativas recomenda-se: a diminuição do consumo de clínquer ou a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios e/ou pozolânicos suplementares, o que faria decrescer a relação clínquer/cimento; a utilização de agregados reciclados; a utilização de concreto de alto desempenho, que apesar do maior custo dos materiais devido ao elevado consumo de material cimentício, conduz a um menor custo unitário por MPa (MegaPascal); e o uso do concreto protendido pelo uso ativo da seção transversal, que trabalha integralmente à compressão, havendo diminuição do volume de concreto (Isaia, 2005).

Além disso, segundo John (2000), a durabilidade, expressa pela vida útil de um conjunto de componentes, desempenha uma função importante para a obtenção de uma construção sustentável, pois com o maior tempo de vida do material, menor será a utilização de novos materiais para a manutenção, ou até mesmo reconstrução de uma estrutura. Hoje em dia é usualmente aceito que, ao se projetar uma estrutura, as características de durabilidade dos materiais em questão devam ser avaliadas com o mesmo cuidado que outros aspectos como, por exemplo, propriedades mecânicas e custo inicial (Levy, 2001).

Dentro deste contexto, nos últimos anos inúmeras pesquisas têm sido realizadas visando à substituição parcial do cimento por materiais suplementares, buscando a redução do consumo de cimento. Outro aspecto abordado em inúmeras pesquisas diz respeito à adição de agregados reciclados (resíduos) em concretos e argamassas na busca por redução da prospecção de agregados e também por agregar valor aos resíduos. O Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) é uma das instituições que vem realizando estudos sobre a incorporação de diversos resíduos em concretos e argamassas, bem como produção de novos aglomerantes a partir da ativação alcalina de resíduos para a fabricação de argamassas e concretos (Afonso, 2005; Freitas, 2005; Costa, 2006, Viana, 2007). Estes estudos fazem parte de um Projeto de Cooperação Acadêmica

(PROCAD) que reúne quatro programas de pós-graduação na área de engenharia civil (COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UENF, UFBA – Universidade Federal da Bahia - e UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana) e que pretende, através de pesquisa conjunta, desenvolver materiais e estruturas de baixo impacto ambiental para aplicação na construção civil.

A caracterização, no LECIV/UENF, de resíduos industriais produzidos nas regiões Norte e Noroeste Fluminense para utilização em argamassas e concretos se inserem no papel social da Universidade, que nasceu para contribuir com o desenvolvimento regional. A UENF está localizada na região Norte Fluminense, onde as indústrias cerâmicas e sucroalcooleiras são duas atividades de destaque do setor produtivo, assim como o beneficiamento de rochas ornamentais.

O parque cerâmico fluminense é constituído por mais de 300 empresas (predominantemente micro e pequenas) distribuídas por todo o estado, com destaque para os municípios de Itaboraí e Rio Bonito (região Metropolitana), Três Rios e Paraíba do Sul (região do Médio Paraíba) e Campos dos Goytacazes (região Norte). Este pólo é o segundo maior produtor de tijolos do Brasil, produzindo cerca de 120 milhões de peças por mês. O principal município produtor deste pólo é Campos dos Goytacazes, onde há mais de 100 unidades produtivas sindicalizadas (cerâmicas e olarias), que produzem cerca de 75 milhões de peças por mês (blocos de vedação, blocos de laje, telhas, tijolos aparentes e piso extrudado) (Ramos *et al.* 2003).

Segundo Ramos *et al.* (2003), Campos dos Goytacazes é responsável por 35% da produção de cerâmica do estado do Rio de Janeiro, abastecendo com cerca de 400 caminhões diários os seguintes mercados: Grande Rio, Sul Fluminense, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo. No entanto, estudo publicado por Saboya (2000) estimou que cerca de 10% do total de cerâmica produzida em Campos dos Goytacazes transforma-se em resíduo durante o processo de fabricação, seja na linha de produção ou na estocagem, desperdício que corresponde a 19 mil toneladas por mês de resíduo.

Os resíduos produzidos por estas indústrias ainda não possuem destinação específica, ficando muitas vezes depositado nos pátios das empresas (Figura 1). Em alguns casos os resíduos são lançados em estradas não pavimentadas, quando estas

ficam em mau estado devido à ação das chuvas ou nas cavas de extração de solo utilizado na produção do material cerâmico.



Figura 1 - Resíduos acumulados no pátio de uma cerâmica.

O trabalho de caracterização do resíduo cerâmico do município de Campos dos Goytacazes, realizado por Costa (2006) no LECIV, abordou a questão da influência da temperatura de queima da cerâmica e da moagem nas características do resíduo, chamado de resíduo de bloco cerâmico moído (RBC), que revelou a viabilidade de utilização do mesmo na forma de adição mineral em argamassas. Observou-se, naquele estudo que o teor de substituição de cimento Portland por até 20% de RBC não compromete as propriedades das argamassas.

No que tange ao setor de rochas ornamentais, o Brasil é um grande produtor e a região sudeste apresenta um papel significativo nesta produção. As principais rochas beneficiadas na região Sudeste são mármore e granito. Resíduos de rocha são gerados em todas as fases de beneficiamento do produto, desde a extração até o acabamento final. Um resíduo fino aparece na fase de corte dos blocos de rochas nas dimensões comerciais e é oriundo da abrasão do disco de corte na rocha. O resíduo de corte de rochas (RCR) é carregado pela água utilizada na refrigeração e lubrificação dos discos diamantados de corte (Figura 2), sendo, em geral, ou descartado como efluente comum ou depositado nos arredores das serrarias de rochas ornamentais (Afonso, 2005).

No município de Santo Antônio de Pádua, no interior do estado do Rio de Janeiro, onde a produção de rochas ornamentais é uma das principais atividades econômicas, a geração deste resíduo gira em torno de 720 toneladas mensais, contabilizando-se somente as indústrias que possuem tanques de decantação e separação da fase sólida do efluente (Afonso, 2005). De acordo com dados da rede cooperativa de Pesquisa e uso de bens minerais destinados à construção civil do Rio de Janeiro (RETECMIN/RJ), a localidade possui cerca de 100 serrarias, das quais 46 fazem a separação entre RCR e a água em unidades de tratamento de efluentes (tanques de decantação) (Figura 3a). O resíduo que decanta no fundo dos tanques é bombeado periodicamente para locais próximos às indústrias, geralmente em cavas. A Figura 3b mostra uma cava que têm uma profundidade aproximada de 3 metros abaixo do nível do terreno e altura de 2 metros acima do nível deste. Surge assim o problema de destinação final do resíduo, ainda sem solução específica.



(a)

(b)

Figura 2 – (a) Corte dos blocos de rocha com disco diamantado; (b) resíduo carreado pela água.

Um tipo de RCR, assim como um RBC, já foi caracterizado no LECIV e também atende às exigências necessárias para utilização como parte constituinte de argamassas de múltiplo-uso em substituição da cal (Afonso, 2005). De uma forma geral, em relação à resistência mecânica, as argamassas com adição de RCR apresentaram desempenho igual ou melhor que a argamassa de cimento e cal usada como

referência. Entretanto, a absorção de água observada nesta argamassa precisa ser reduzida para melhor uso do resíduo.

Em Santo Antônio de Pádua, no ano de 2008, foi inaugurada uma fábrica de argamassa do Grupo Mil (Argamil) que passou a utilizar o RCR como parte da matéria-prima em argamassas. O empreendimento teve como um dos parceiros a UENF que, junto com o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), contribuiu no estudo da aplicação do RCR (Filgueiras, 2008).



(a)

(b)

Figura 3 – (a) Resíduo sólido do corte de rochas em tanque de decantação; (b) em cava.

## 1.1. Objetivos e justificativas

Tendo em vista complementar os estudos já realizados no LECIV, esta pesquisa tem como objetivo principal investigar a viabilidade de utilização de um RCR e um RBC em concretos de cimento Portland com resistência à compressão de 25 MPa. A viabilidade de emprego do RCR e do RBC em concretos é avaliada neste trabalho por meio de ensaios mecânicos e de durabilidade. Com isso, pretende-se contribuir para o desenvolvimento das pesquisas relacionadas com o emprego de tais resíduos.

Os objetivos específicos deste trabalho abrangem a realização de um programa experimental para coletar informações que permitam interpretar e entender melhor o comportamento destes concretos com resíduos, em relação à resistência mecânica, módulo de elasticidade, absorção, permeabilidade e quando submetidos a agentes agressivos. Para isso são comparados os resultados de ensaios entre quatro concretos: concreto com materiais convencionais (referência); concreto com 20% de substituição do cimento Portland por RBC; concreto com adição de 10% de RCR sobre a massa de cimento; e um concreto com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício (cimento + RBC). Os seguintes ensaios foram realizados:

- resistência à compressão com curva tensão *versus* deformação e módulo de elasticidade;
- resistência à tração por compressão diametral;
- resistência à tração na flexão;
- absorção de água por imersão e por capilaridade;
- penetração acelerada de íons cloreto;
- permeabilidade a gás;
- resistência à tração na flexão após exposição a ataque por sulfato de magnésio.

## **1.2. Organização da dissertação**

Este trabalho é composto de seis capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 – Introdução ao trabalho, apresentado o RCR e o RBC, ressaltando a importância e o objetivo da pesquisa e mostrando a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica sobre os concretos com adições minerais e procedimentos para avaliação dos concretos no estado fresco e endurecido.

Capítulo 3 – Materiais e métodos experimentais. Esse capítulo apresenta a caracterização dos materiais, dosagem, produção dos concretos e a metodologia experimental adotada na realização dos ensaios.

Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados.

Capítulo 5 - Conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6 – Referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

## 2. Efeito de adições minerais nas propriedades do concreto

A ASTM C 125 define aditivo/adição (em inglês apenas “admixture” ou *chemical and mineral admixture*, respectivamente) como qualquer material – que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras – usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante da mistura (Mehta e Monteiro, 2008).

No Brasil, as especificações para aditivos e adições estão contidas na NBR 11172 (1990) que define o termo “aditivo” para “*produto químico adicionado em pequenos teores às caldas, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características no estado fresco e/ou no endurecido*” e o termo “adição” para designar “*produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características*”. Mehta e Monteiro (2008) definem adições minerais como materiais insolúveis finamente moídos, de fontes naturais ou alguns subprodutos industriais. Assim, neste trabalho o termo adição mineral é usado para designar o RCR e o RBC.

O efeito físico da presença das adições minerais no concreto fresco se torna imediatamente aparente após endurecimento da pasta, mas leva vários dias ou até vários meses, para que os efeitos químicos se manifestem (Mehta e Monteiro, 2008). As adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos: material pozolânico; material cimentante; e filler (Dal Molin, 2005).

Os materiais pozolânicos são representadas por todos os materiais inorgânicos, tanto naturais ou artificiais, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade cimentícea, mas quando finamente divididos e misturados com o hidróxido de cálcio ou materiais que podem liberar hidróxido de cálcio (clínquer de cimento Portland), endurecem na presença de água e temperatura ambiente, (Massazza, 1998). Como exemplo, pode-se citar dentre outros: cinza volante; pozolana natural; sílica ativa; cinza da casca de arroz; metacaulim; material cerâmico moído. Tantos os materiais naturais como os artificiais podem necessitar de um processamento adicional (por exemplo, britagem e moagem) para se adequarem como materiais pozolânicos para uso em cimento e concreto (Dal Molin, 2005).

Alguns tipos de argilas, como as caulínicas, por exemplo, ganham atividade pozolânica quando queimados a temperatura entre 600 e 900°C (Massazza, 1998). O RBC tem como matéria-prima argilas caulínicas (Costa, 2006) e a temperatura de queima corresponde a aproximadamente 750°C, logo o RBC, provavelmente, possui alguma atividade pozolânica.

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta, e a quantidade de produtos formados é insuficiente para a aplicação do material para fins estruturais. Como exemplo, pode-se se citar a escória granulada de alto forno (Dal Molin, 2005).

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação resume ao efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Como exemplo pode-se se citar o fíler calcário e quartzo moído (Dal Molin, 2005).

Deve-se salientar que a eficiência de uma adição mineral pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da composição química, mineralógica e granulométrica. As duas últimas características são as principais responsáveis pela ação diferenciada das adições no comportamento do concreto.

O presente capítulo resume alguns aspectos do concreto fresco e endurecido que sofrem mudanças com a incorporação de adições minerais, podendo ser considerados como indicativos de tendências gerais, que são importantes para a interpretação dos resultados desta dissertação.

## **2.1. Concreto no estado fresco**

### **2.1.1. Aspectos reológicos e consumo de água**

O concreto pode ser caracterizado, do ponto de vista reológico, por grandezas como coesão<sup>1</sup> e viscosidade<sup>2</sup>. Essas grandezas são afetadas pela incorporação de

---

<sup>1</sup> Coesão do concreto é responsável por sua capacidade de se manter na posição original sob pequenas tensões.

adições minerais, assim como o consumo de água. Este depende da forma e da superfície específica das partículas da adição mineral e da quantidade utilizada. O problema do aumento do consumo de água com as adições minerais pode ser perfeitamente resolvido com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes (Dal Molin, 2005).

Segundo Male (1989), as pequenas partículas das adições minerais, em grande número, agem como bloqueadoras de poros, aumentando o contato sólido-sólido. Dessa forma os concretos com adições tendem a ser mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e exsudação, quando comparados a um concreto sem adição.

O consumo de água de concretos com adições minerais depende da forma, e da superfície específica dessas adições e da quantidade utilizada em substituição ao cimento (Silva, 2006).

Observa-se que, embora todas as adições tendam a melhorar a coesão e trabalhabilidade do concreto fresco, algumas apresentam capacidade redutora de água como a cinza volante e a escória devido a sua estrutura vítrea e sua forma esférica. Porém, para uma mesma consistência do concreto, o uso de materiais com alta área superficial específica, como pedra pomes, cinza da casca de arroz, sílica ativa, e metacaulim aumentam a demanda d`água (Silva, 2006; Mehta e Monteiro, 2008).

Faganello *et al.* (2007) avaliaram a incorporação de resíduo do corte e acabamento de chapas de mármore e granito e Gonçalves (2000) estudou a adição de resíduo de corte de granito em concretos, e concluíram que as misturas com incorporação do resíduo apresentam no estado fresco maior coesão e consistência em consequência do aumento da quantidade de finos, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água (exsudação). Este fato pôde ser comprovado pela dificuldade de homogeneização das misturas.

Schumacher *et al.* (2007) estudaram o uso de pó-de-pedra, em substituição a pequenas porcentagens de areia natural e concluíram que, geralmente, quanto maior a quantidade de pó-de-pedra, menos trabalhável o concreto fica, e que quanto maior a substituição de areia por pó-de-pedra maior o consumo de água. O mesmo foi

---

2 Viscosidade caracteriza a estabilidade do concreto, que envolve sedimentação e segregação, agindo como movimento relativo dos grãos

concluído por Quebaud *et al.* (2006) que estudaram concretos e argamassas com adição de vários teores de pó-de-mármore.

No caso da substituição do cimento por metacaulim há aumento do consumo de água, sendo o efeito redutor da trabalhabilidade tanto maior quanto maior a superfície específica dos grãos, (Dal Molin, 2005). Esta característica também foi observada por Vieira (2005), em concretos com substituição do cimento por resíduo cerâmico moído.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a coesão da mistura é controlada pelo volume de pasta presente no concreto, assim sendo, tem-se com a substituição em massa de cimento por pozolanas com menor massa específica, o aumento da quantidade de pasta no concreto, o que resulta numa melhoria do aspecto reológico da mistura.

A trabalhabilidade, que é considerada uma característica reológica do concreto, tem efeito direto na capacidade de bombeamento e no controle de defeitos do mesmo, porque determina a facilidade com que uma mistura pode ser manipulada sem que haja segregação prejudicial. Na maioria das vezes, uma mistura de concreto de difícil lançamento e adensamento não somente aumenta o custo de manipulação, mas também terá pouca resistência, durabilidade e aparência deficiente (Mehta e Monteiro, 2008).

A avaliação da trabalhabilidade é, em geral, realizada de forma indireta pelo ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone (ABNT NM 67, 1998). A consistência, avaliada em termos de abatimento, depende da umidade da mistura de concreto, isto é, quanto mais úmida a mistura, maior o abatimento (Mehta e Monteiro, 2008).

A trabalhabilidade do concreto para uma obra ou construção é determinada em função das características da mesma e dos meios de mistura, lançamento e adensamento disponíveis. Porém vale lembrar que misturas de concreto muito fluidas tendem a segregar e exsudar, afetando desfavoravelmente o acabamento. Misturas muito secas podem ser difíceis de lançar e adensar, e o agregado graúdo pode segregar no ato do lançamento (Guimarães e Santos, 1999). A Tabela 1 apresenta valores de abatimento do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento, conforme classificação de Petrucci (1978).

Tabela 1 - Classificação, medidas, aplicação e condições para adensamento de concretos frescos – desconsiderando o uso de aditivos (Petrucci, 1978).

Consistência	Abatimento (mm)	Tipos de obras	Condições de adensamento
Extremamente seca	0	Pré-fabricados	Condições especiais de adensamento
Muito seca	0	Grandes massas, pavimentação	Vibração muito enérgica
Seca	0 - 20	Estruturas de concreto armado ou protendido	Vibração enérgica
Rija	20 - 50	Estruturas correntes	Vibração normal
Plástica (média)	50 - 120	Estruturas correntes, concreto bombeado	Vibração normal ou adensamento manual
Úmida	120 - 200	Estruturas correntes, paredes diafragma, sem grande responsabilidade	Adensamento manual ou auto-adensável
Fluida	200 - 250	Concreto inadequado para qualquer uso	-

Assim, pode-se esperar que a utilização tanto do resíduo de corte de rocha quanto do resíduo de cerâmica em concretos aumentará a coesão e a demanda de água, e reduzirá a trabalhabilidade.

## 2.2. Concreto no estado endurecido

### 2.2.1. Resistência à compressão

A resistência mecânica do concreto com adições minerais e a sua evolução com o tempo dependem, dentre outros fatores (Dal Molin, 2005):

- ✓ da quantidade e características da adição mineral (tamanho das partículas, quantidade de SiO<sub>2</sub> na forma amorfa, entre outros);
- ✓ do proporcionamento do concreto (tipo e consumo de cimento, relação água/cimento, presença de superplastificantes *etc.*);
- ✓ das condições de cura.

Em princípio, pozolanas adicionadas ao concreto melhoram a qualidade do concreto com relação à resistência e durabilidade. Quando usado como uma substituição parcial do cimento Portland, as adições minerais costumam ter um efeito retardador sobre a resistência nas primeiras idades (Massazza, 1998; Mehta e Monteiro, 2008).

Estudos com a incorporação de fíler mostraram um incremento no grau de hidratação do cimento. Tendência similar tem sido relatada para resistência mecânica de argamassas com fíleres de diferentes origens (calcário, granítico e silício) quando incorporados, e este incremento de resistência mecânica tem sido atribuído às partículas de fíler, que estimulam a reação de hidratação (Rahhal e Talero, 2005).

A adição de resíduo de corte de granito em concretos, em teores de 10 e 20%, possibilitou um ganho médio de resistência à compressão de 8% e 20%, respectivamente, em relação ao concreto de referência (Gonçalves, 2000). Esse aumento de resistência foi devido ao efeito fíler do resíduo, que promoveu um refinamento na estruturas de poros. Fíleres podem alojar-se entre os grãos de clínquer, promovendo um melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura.

Gonçalves (2005) mostrou que o resíduo cerâmico em substituição ao cimento em até 30% não influenciou significativamente a resistência à compressão dos concretos aos 28, 90 e 180 dias. Ainda segundo Gonçalves (2005), a quantidade de hidratos formados e o efeito físico do resíduo cerâmico não reagido ainda mantêm a matriz com uma estrutura sólida suficiente para manter a resistência a compressão.

Evangelista *et al.* (2004) estudaram a substituição do cimento em vários teores por resíduo cerâmico em argamassas e concluíram que houve uma pequena redução da resistência à compressão em relação ao traço de referência. Segundo os autores, haverá aumento de resistência apenas se houver reação pozolânica em grande quantidade.

Carrasco *et al.* (2005) estudaram a interação entre as adições fíler calcário e escória de alto-forno em argamassas com substituição de até 22% do cimento. Para todas as idades houve uma mistura ternária que apresentou maior resistência, em relação às misturas binárias cimento Portland e fíler calcário ou escória de alto-forno. Este efeito foi atribuído ao comportamento complementar das adições. O fíler calcário

melhorou a resistência nas primeiras idades e a escória de alto-forno melhorou a resistência em idades avançadas.

### **2.2.2. Resistência à tração**

As adições minerais levam a uma redução significativa na porosidade da matriz e na zona de transição. Esse fato, geralmente, leva a uma melhora da resistência à compressão e à tração do concreto, mas aparentemente a magnitude do aumento da resistência à tração se mantém relativamente pequena (Mehta e Monteiro, 2008). Este fato foi comprovado por Gonçalves (2000) quando adicionou resíduo de corte de granito ao concreto.

A substituição de cimento por resíduo cerâmico não provocou variação na resistência à tração por compressão diametral nem na resistência à tração na flexão do concreto (Gonçalves, 2005). Assim como na resistência à compressão, um aumento significativo da resistência à tração se dará somente quando ocorrem às reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de portlandita, o que acontece em idades mais avançadas (Dal Molin, 2005; Silva, 2007).

### **2.3. Parâmetros físicos e de durabilidade**

Para que a sustentabilidade seja atingida é necessária a produção de estruturas de elevada durabilidade. Para Sarja e Vesikari (1996), genericamente o termo “durabilidade” pode ser definido como a capacidade de um edifício, componente, estrutura ou produto manter um desempenho mínimo em um determinado tempo, sob a influência de agentes agressivos. Especificamente para o material concreto, de acordo com o ACI 201.2R (2001), durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto a determinado ambiente. Porém, a manutenção das estruturas será sempre necessária,

indiferentemente de seus materiais constituintes, já que nenhum material dura eternamente.

Hoje se observa uma preocupação maior com a qualidade de serviços e de produtos para garantir um menor custo do conjunto produção e manutenção. Mehta e Monteiro (2008) consideram que um material atingiu o final de sua vida útil quando as suas propriedades, sob dadas condições de uso, deterioraram a tal ponto que a continuação de seu uso se torna insegura ou antieconômica.

Em função dos conhecimentos acumulados sobre as patologias que afetam o concreto, a tecnologia das estruturas de concreto associa uma maior durabilidade com a adoção de concretos com resistências mais elevadas, apresentando reduzida relação água/cimento, baixa permeabilidade, controle de ações deletérias como a reação álcali-agregado, retrações hidráulica e plástica *etc.* (Andrade e Costa e Silva, 2005).

As patologias mais nocivas observadas no concreto são relacionadas aos fenômenos de transporte que podem ocorrer na matriz. Neste contexto, sem dúvida alguma, a permeabilidade aparece como uma propriedade muito importante frente à durabilidade de concretos, sejam estes convencionais ou com adições de resíduos. As degradações químicas como a carbonatação, ataques por sulfatos e cloretos *etc.*, são proporcionais à permeabilidade do concreto (Nepomuceno, 2005).

Assim, nos próximos tópicos abordam-se algumas das propriedades na avaliação da durabilidade dos concretos.

### **2.3.1. Absorção de água e permeabilidade**

De uma forma geral, a durabilidade de concretos, sejam eles produzidos com constituintes naturais ou reciclados, está relacionada diretamente com a menor ou maior facilidade do transporte de fluidos dentro do concreto. Segundo Nepomuceno (2005), as substâncias agressivas, tanto para o concreto como para as armaduras, penetram através da rede de poros da microestrutura do concreto. Entre as diversas substâncias que podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto armado, destacam-se a água, pura ou com íons dissolvidos, especialmente íons cloretos e sulfatos, o CO<sub>2</sub> e o oxigênio. As forças impulsoras do transporte dessas substâncias no concreto podem ser: a diferença de concentração, de pressão, de

temperatura, de densidade, de potencial elétrico e sucção capilar. Ou seja, o transporte depende do ambiente em que a estrutura está inserida, assim como da dosagem e dos materiais constituintes.

O concreto é um material poroso, pois no seu processo de produção geralmente se utiliza uma quantidade de água superior àquela necessária para sua hidratação. Este excesso, que não participa das reações de hidratação, migra para o meio externo, formando, na sua passagem, uma rede de poros capilares, que concebe a estrutura porosa do concreto e que torna o sistema suscetível à ação de agentes agressivos. Além disto, há a redução dos volumes absolutos de cimento e água, que reagem entre si, e a incorporação de ar à massa durante a mistura. Um concreto com características de durabilidade deve apresentar uma estrutura bastante compacta, com o menor número de vazios e interconexões entre seus poros, pois, em geral, quanto maior a compacidade, menos permeável será o concreto. O volume de vazios capilares na pasta depende da quantidade de água misturada com o cimento, no início da hidratação, e do grau de hidratação do cimento (Mehta e Monteiro, 2008).

Segundo Velasco (2002), em um concreto de resistência normal, a rede capilar torna-se cada vez mais espessa à medida que a relação água/material cimentício aumenta. Para Helene (1993), mais importante do que o diâmetro dos capilares é a sua distribuição e intercomunicabilidade, o que nem sempre se leva em conta. Assim, concretos de reduzida relação água/cimento, além de terem capilares de menor diâmetro, os mesmos se apresentam menos intercomunicáveis, resultando em menor massa de água absorvida.

A origem do potencial capilar são as forças capilares, devido à tensão existente entre a superfície da água e as paredes dos poros, que é dependente da umidade interna do concreto, da densidade e viscosidade da água, da temperatura e das características dos poros como raio, tortuosidade e conectividade. No caso do concreto, todos os fatores que intervêm na microestrutura porosa e sua conectividade influirão na absorção capilar, tais como a já citada relação água/cimento, a cura, o uso de aditivos incorporadores de ar, adições minerais, volume de agregados *etc* (Nepomuceno, 2005).

As adições minerais, pozolanas ou fíleres além de influenciarem nas propriedades dos concretos no estado fresco e nas propriedades mecânicas nas idades iniciais, exercem forte influência na durabilidade, uma vez que reduzem o tamanho dos

poros e a permeabilidade da mistura. A incorporação de materiais pozolânicos, como adição ou em substituição ao cimento Portland, em geral, quando em teores adequados, aumenta a durabilidade de argamassas e concretos, desde que seja efetuada uma cura adequada. Este fato ocorre devido à portlandita, oriunda das reações de hidratação do cimento, reagir com a pozolana para formar produtos de hidratação secundários (silicato de cálcio hidratado, C-S-H, de baixa densidade) que preenchem os vazios capilares grandes e refinam a estrutura dos poros. Isto acarreta redução de porosidade e ganho de resistência mecânica. À medida que se reduz o ingresso de agentes agressivos, o concreto se torna mais resistente a ambientes agressivos, desde que não ocorram alterações críticas na microestrutura como, por exemplo, uma queda significativa da reserva alcalina (Mehta e Monteiro, 2008).

O ensaio de resistência à penetração de água nos materiais cimentícios, assim como qualquer ensaio de permeabilidade, por si só, não prevê com precisão a vida útil destes materiais. Porém, como os processos de deterioração das argamassas e concretos envolvem o transporte de fluido e íons agressivos pela rede de poros, a absorvidade pode ser um indicativo de qualidade desses materiais. Desta forma, a absorvidade pode ser correlacionada com a probabilidade de degradação, pois materiais com elevados valores de absorvidade, dentro das mesmas condições ambientais, terão maior probabilidade de serem deteriorados, devido a maior propensão à penetração de agentes agressivos e, conseqüentemente, diminuição no tempo de vida útil (Gonçalves, 2005).

Afonso (2005) estudou 7 traços de argamassas com adição de RCR e observou que todas as misturas tiveram valores de absorção de água por capilaridade maiores, em relação ao traço de referência, observando uma absorção maior para o maior teor de RCR. A determinação da absorção de água por capilaridade seguiu as determinações da NBR 9779 (1995). Partículas inertes geram novas zonas de interface e transição deixando o material mais poroso. Isto é indicativo de que o filer empregado não é fino o suficiente.

Gonçalves (2000) avaliou concretos com adição de 10 e 20% de resíduo de corte de granito utilizando o ensaio de absorção por sucção capilar, proposto por Kelham (1988). Houve, para o concreto com adição de 10%, uma redução significativa da taxa de absorção (cerca de 20%) em relação ao concreto de referência. Já para o concreto

com adição de 20% de resíduo, houve um aumento da taxa de absorção em relação ao concreto de referência. Aparentemente, para o teor menor de resíduo ocorreu um certo preenchimento dos poros pelas partículas da adição, ocasionando uma barreira física ao movimento ascendente da água (exsudação).

Concretos de alto desempenho com incorporação de pó-de-pedra, com teores de 10% e 60%, estudados por Toralles-Carbonari *et al.* (2004), foram submetidos ao ensaio de absorção por capilaridade e por imersão. Os autores observaram que os concretos com 10% de incorporação de pó-de-pedra apresentaram valores de absorção inferiores aos concretos de referência. Já os concretos com 60% apresentaram resultados de absorção muito altos.

Gonçalves (2005) produziu argamassas com relação água/aglomerante, de 0,4 e 0,5, teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico variando de 10% a 40%, em massa. Neste estudo o autor concluiu que a utilização do resíduo promoveu uma redução na absorvidade para todos os teores de substituição e relação água/aglomerante. Concretos estudados por Gonçalves (2005), contendo 20% de resíduo cerâmico em substituição ao cimento, também apresentaram menor penetração de água e, conseqüentemente, menor possibilidade de penetração de agentes agressivos provenientes do meio ambiente. A redução na absorvidade das misturas contendo resíduo cerâmico ocorreu devido à formação de uma rede porosa com diâmetros menores, mais refinada que dificultou a penetração de água.

A permeabilidade do concreto é um dos parâmetros mais críticos na determinação de sua durabilidade em ambientes agressivos. Quando a permeabilidade do concreto diminui, seu desempenho de durabilidade, em termos de degradação físico-química, aumenta (Lynsdale e Khan, 2000).

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela interconectividade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (Mehta e Monteiro, 2008). Alguns fatores como a relação água/cimento, o grau de hidratação, o tipo de cimento, as adições minerais, os agregados, a temperatura, os procedimentos de cura, o adensamento, entre outros, são determinantes para a formação da estrutura dos poros e capilares e, conseqüentemente, definidores de uma maior ou menor permeabilidade dos concretos (Barin, 2008).

Cabe lembrar que os mecanismos de transporte para a permeabilidade e absorção capilar são distintos, embora ambos dependam da porosidade, distribuição e interconexão dos poros. O crescimento mais acentuado da absorção capilar do que a permeabilidade ocorre, visto que a absorção capilar dá-se sob pressão atmosférica e relaciona-se com a porosidade aberta do corpo-de-prova ao meio externo, enquanto na permeabilidade o fluido encontra-se sob pressão e deve percolar por todo o corpo-de-prova, dependendo, conseqüentemente, da interconectividade dos poros por toda a matriz (Hoppe Filho, 2002).

Hoppe Filho (2002) estudou o efeito da substituição de parte do cimento por várias adições pozolânicas e adição de cal hidrata em concretos na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar. Neste estudo o uso de adições minerais reduziu os coeficientes de permeabilidade ao oxigênio devido ao efeito microfíler, que obstrui os poros, associado ao refinamento da rede capilar, advindos das reações pozolânicas, o que dificulta a percolação de fluidos pelo concreto. Já na absorção capilar o efeito microfíler foi menos significativo, pois a diminuição do diâmetro dos poros associado à porosidade aberta para a superfície do concreto facilita a sucção capilar, embora a formação do C-S-H secundário propicie decréscimos na absorção, mas com pouca intensidade, logo todas as misturas com adições obtiveram valores de absorção capilar superior ao concreto de referência.

### **2.3.2. Ataque por íons cloreto**

Existe no meio científico um consenso a respeito da corrosão das armaduras: é a principal causa de deterioração das estruturas em concreto armado (Helene e Monteiro, 2003; Pereira, 2001; Saciloto, 2005, entre outros). Nestas estruturas, o concreto exerce um duplo papel como de material resistente e de proteção da armadura contra agentes deletérios.

Diversas situações podem desencadear a corrosão das armaduras, entre elas a exposição a ambientes ácidos, comuns em estruturas industriais, a carbonatação, a ação de bactérias e a penetração de cloretos. Com exceção da última situação, ocorre nos demais casos uma redução da alcalinidade natural do concreto, causando a dissolução da camada passivante que protege a armadura da corrosão. Entretanto, os

íons cloreto são especialmente agressivos, pois são capazes de despassivar a armadura mesmo em condições de pH extremamente elevado (Teixeira, 1998).

As estruturas de concreto podem apresentar contaminação por íons cloreto de duas formas, em uma delas, os íons podem ser introduzidos no concreto, oriundos da composição de adições ou pela contaminação da água ou da areia. Além disso, os íons podem ainda penetrar desde o exterior em ambientes marinhos ou industriais (Cascudo, 2005). Neste trabalho será considerada apenas a penetração dos íons de meio exterior.

O ingresso de íons cloreto no concreto ocorre através da rede contínua do sistema capilar poroso da pasta de cimento Portland, através do sistema de poros da zona de transição pasta-agregado e, eventualmente, através de microfissuras. Os mecanismos de ataque incluem permeação de soluções salinas, absorção capilar de líquidos contendo cloretos e difusão de íons cloreto livres. Dependendo das condições de exposição e do teor de umidade do elemento de concreto, esses mecanismos podem ocorrer simultaneamente em seqüência, durante períodos consecutivos de tempo ou um deles pode ser o mecanismo exclusivo de transporte (Pereira, 2001).

Certa quantidade de íons pode ser tolerada sem risco de corrosão, uma vez que, após reagirem com os aluminatos, provenientes do clínquer, esses íons não estão mais livres para atacar o filme passivante (Hansson *et al.* 1985 *apud* Figueiredo, 2005). Quando a quantidade de íons cloreto atinge um valor limite de concentração, os íons cloreto rompem a camada passivante e iniciam o processo de corrosão da armadura, que afeta significativamente a durabilidade, ocasionando conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas, diminuindo a sua vida útil (Helene e Monteiro, 2003).

O caráter básico do concreto é dado pela solução altamente alcalina presente nos poros do mesmo, a qual possui pH que varia de 12 a 14 (Gonçalves, 2005). As armaduras nas estruturas de concreto armado encontram-se protegidas do meio por uma barreira física que é o revestimento de concreto e dentro do concreto por uma película passivadora composta de  $Fe_3O_4$  ou  $Fe_2O_3$  ou pela mistura desses dois óxidos. A ruptura da capa passivante pela ação dos íons cloreto se dá localmente, ou seja, a presença destes íons provoca uma dissolução pontual desta película e, dada a presença de água e de oxigênio, facilita o início do processo corrosivo. Esta ruptura da

camada protetora de passivação pelos cloretos gera pequenas áreas ativas chamadas “pites”, de pH muito baixo (em torno de 3), que funcionam como ânodo, e no qual o metal é dissolvido. Nas proximidades há a zona catódica, de elevado pH (em torno de 13,5), onde ocorre a redução do oxigênio como mostra a Figura 4. Vale ressaltar que os íons cloreto não são consumidos nas reações de corrosão, permanecendo sempre presentes (Pereira, 2001; Vieira, 2003).

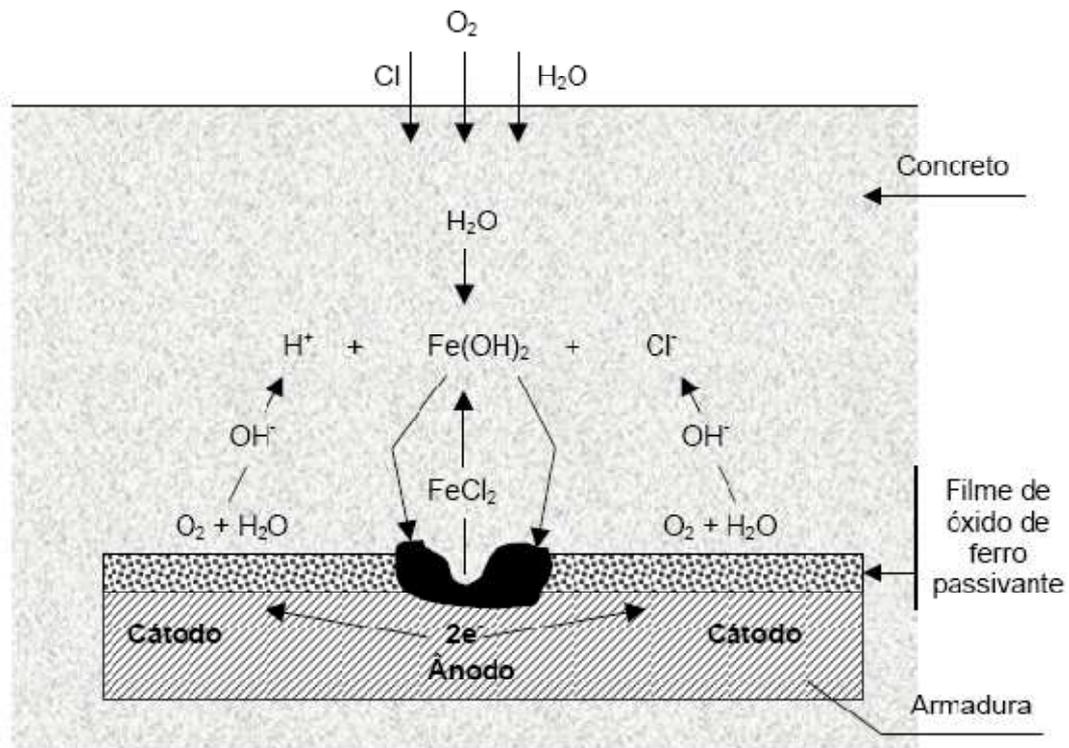


Figura 4 - Esquema da corrosão por “pites” devido à atuação dos íons cloreto (Thompson *et al.*, 1988)

Existem vários fatores inerentes ao concreto que influenciam a penetração dos íons cloreto, dentre eles enumeram-se como principais: a relação água/cimento, a composição química do cimento e adições. A relação água/cimento exerce grande influência na penetração de cloretos por governar a formação de poros (porosidade) e da rede porosa (permeabilidade) da pasta de cimento hidratada. Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e a permeabilidade de um concreto e, conseqüentemente, maior será a penetração de cloretos (Gonçalves, 2005).

Sobre a composição química do cimento, a quantidade de  $C_3A$  e  $C_4AF$  do clínquer determina a capacidade de combinação com os íons cloreto (Gonçalves, 2005; Bakker 1988 *apud* Figueiredo, 2005). Cimentos com baixos teores de  $C_3A$  e  $C_4AF$  possuem pouca capacidade de imobilizar os íons cloretos. Esta fixação ocorre pela reação dos íons cloreto com os aluminatos através da formação de um sal insolúvel complexo, o cloroaluminato de cálcio hidratado (sal de Friedel), que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto (Page *et al.*, 1986).

As adições minerais, quando devidamente proporcionadas na mistura, reduzem significativamente o ingresso de agentes agressivos e aumenta a resistividade do concreto, reduzindo assim a velocidade de corrosão da armadura. Isso ocorre porque essas adições ocasionam a segmentação dos poros maiores, incrementam os locais de nucleação para a precipitação de produtos de hidratação, acelerando estas reações, formando cristais de portlandita menores e diminuindo o efeito de parede na zona de transição entre a pasta e o agregado (Neville, 2001; Saciloto, 2005). A ação química (pozolânica) reforça a ação física, segmentando em maior grau os poros e refinando os grãos de portlandita com o aumento da idade (Mehta e Monteiro, 2008).

Os resultados de Gonçalves (2005) apontaram que a substituição do cimento por resíduo cerâmico em argamassas, nos teores de 10% e 20%, promoveu uma redução de 1,5 e 6 vezes, respectivamente, na penetração de íons cloreto devido ao aumento da quantidade de mesoporos, o que dificultou o deslocamento dos íons no interior da matriz.

A presença de alumínio na forma amorfa do resíduo cerâmico, quando combinado com íons cloreto também promovem a formação do sal de Friedel. Este fato, realmente, poderia ser entendido como favorável à recomendação do uso deste material de substituição do cimento, em razão da diminuição dos íons na solução proporcionada por tais combinações químicas. No entanto, estes sais contendo cloro dissolvem em pHs relativamente elevados (10,0), o que parece acontecer com o aumento do teor de substituição do cimento por resíduos cerâmicos, o que devolveria mais íons cloreto para a solução, e, conseqüentemente, restauraria seu potencial destrutivo com relação à corrosão das armaduras (Vieira, 2005).

Portanto, o efeito combinado da presença dos íons cloreto, carbonatos e daqueles oriundos da solubilidade do resíduo e suas interações com as fases reativas do cimento torna a análise da eficiência destes cimentos quanto à corrosão bastante complexa. Se por um lado, a reação pozolânica promovida pelo resíduo cerâmico tende a melhorar as propriedades da matriz de cimento, por outro lado, a redução do pH, provocada pela diluição do cimento em decorrência de sua substituição por este resíduo, aliada a redução do potencial de corrosão em ambientes salinos parece alterar as condições termodinâmicas do sistema aço-concreto-resíduo (Vieira, 2005).

Estudo feito por Rocha *et al.* (2006), sobre penetração acelerada de íons cloreto, mostra que a presença de RCR, substituindo 20% da areia, ou RBC, substituindo 20% do cimento, em argamassas, reduziu em 11% e 70%, respectivamente, a penetração dos íons cloreto quando comparadas com argamassas de referência de cimento e areia convencionais.

Entretanto, resultados de ensaios de penetração de cloretos realizados por Winck *et al.* (2000), em concretos com substituição em massa, de cimento por fíler nas proporções de 12,5, 25 e 50%, mostraram que quanto maior o teor de substituição, maior a penetração de cloretos. Este mesmo comportamento foi observado por Irassar *et al.* (1999), em concretos com adições de 10 e 20% de fíler calcário, com maior penetração de cloretos nos concretos produzidos com fíler em relação aos concretos confeccionados sem adição.

### **2.3.3. Ataque por sulfatos**

O ataque por sulfato é uma importante causa de degradação do concreto. Os sulfatos reagem quimicamente com alguns compostos presentes no cimento endurecido em diferentes níveis de intensidade, provocando expansões internas que geram microtensões e, conseqüentemente, microfissuras, aumentando a permeabilidade. Com o aumento da intensidade do ataque ocorre uma queda progressiva de resistência mecânica e de massa do concreto devido à perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento. São particularmente comuns os sulfatos de magnésio, de amônia, de sódio, de cálcio e de potássio, que são provenientes das águas do mar, subterrâneas, residuais, de chuvas ácidas, de solos argilosos sulfatados e da atmosfera

(ambientes industriais) (Moura, 2000; Dias, 2001; Coutinho 2001; Centurione *et al.*, 2003; Altheman, 2002; Gonçalves, 2005; Cordeiro, 2006).

A etringita secundária no concreto endurecido é o principal produto formado durante o ataque por sulfato, podendo ocorrer de duas formas: ataque por sulfatos devido à presença de íons sulfato livres no interior do concreto e ataque por sulfatos devido a íons provenientes de fonte externa (solo, água e meio ambiente) que podem penetrar no concreto (Collepari, 1996). Neste trabalho, abordar-se-á o ataque por sulfato proveniente do meio externo.

Quando o concreto é exposto a uma fonte de íons sulfato solúveis, a concentração de sulfatos na solução nos poros do concreto pode aumentar. Em alta concentração de íons sulfato, o monosulfoaluminato pode se tornar instável e se reverter em etringita secundária (Tikalsky e Carrasquillo, 1989).

Comumente, considera-se esta reação como uma fonte importante de problemas devido à formação da etringita secundária, que ocupa duas vezes o volume do monosulfoaluminato. Inicialmente a etringita formada ocupa os espaços na rede de poros capilares e na interface dos agregados, densificando a matriz, sem provocar expansões, podendo até mesmo aumentar a resistência mecânica. Com a continuidade do ataque, mais etringita secundária é formada e os espaços vazios já não são suficientes para acomodar o aumento de volume (Gonçalves, 2005). Desta forma, tensões internas são geradas e provocam fissuras, conforme mostra a Figura 5.

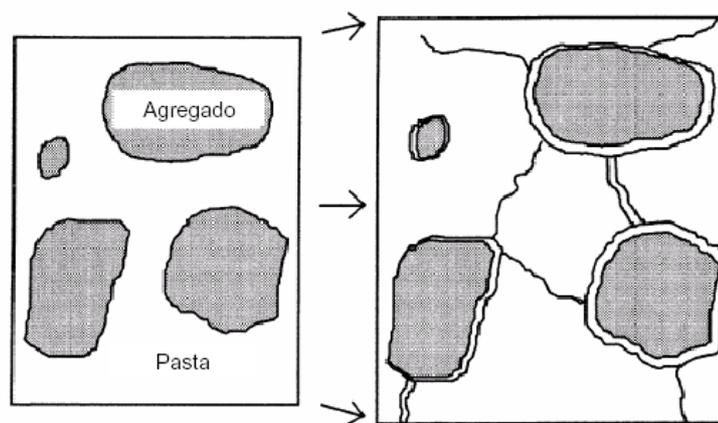


Figura 5 - Diagrama mostrando o mecanismo de expansão de argamassas e concretos devido à formação da etringita secundária (Gonçalves, 2005).

As águas que contêm sulfato de magnésio são as mais agressivas, podendo-se afirmar que dentre os sais de sulfato é aquele que tem o mais alto poder de reação. O sulfato de magnésio, além das reações com o hidróxido de cálcio e com os aluminatos, tem uma ação mais intensa que os outros sulfatos, pois decompõe os silicatos hidratados. A formação de sulfoaluminato de cálcio é característica das reações entre o  $C_3A$  hidratado e as soluções de  $MgSO_4$ , para qualquer concentração de  $MgSO_4$  no  $C_3A$  hidratado (Moura, 2000; Dias, 2001; Cordeiro, 2006). Logo, neste trabalho foi feita a opção pelo sulfato de magnésio para a avaliação da influência das adições minerais na resistência ao ataque por sulfatos.

Há consenso na literatura que concretos de baixa permeabilidade dificultam o ingresso de agentes agressivos e, conseqüentemente, a deterioração por sulfatos, pois tendem a manter baixa a concentração dos íons sulfatos na matriz cimentícia, o que previne a deletéria formação da etringita secundária a partir do monosulfoaluminato. A baixa permeabilidade pode ser alcançada reduzindo-se a relação água/cimento, aumentando-se o consumo de cimento, otimizando-se os parâmetros de dosagem, garantindo-se uma cura eficiente e utilizando-se adições minerais.

O uso de adições minerais que reduzem a permeabilidade pode incrementar a durabilidade dos materiais cimentícios devido ao aumento da resistência ao ataque por sulfatos, devido ao maior refinamento dos poros que dificultam a penetração destes agentes agressivos. Além disso, o uso de adições minerais (pozolanas) traz benefícios como: redução do teor de hidróxido de cálcio que pode reduzir a formação do gesso secundário (gipsita); redução da presença de compostos de  $C_3A$  que causam a formação da etringita secundária; geração de hidratos adicionais que podem reduzir a permeabilidade e aumentar a densificação dos concretos, dificultando a penetração dos íons sulfato. Vários estudos têm mostrado o efeito benéfico do uso de adições minerais no concreto, como sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno. A argila calcinada e o resíduo cerâmico também melhoram a resistência ao ataque por sulfatos (Gonçalves, 2005).

Wild *et al.* (1997) avaliando a resistência a sulfatos (concentração de 5% de sulfato de sódio) de argamassas com a utilização de 10% e 20% de resíduo de tijolos cerâmicos moídos como substituto parcial do cimento Portland, verificaram que a utilização do resíduo produziu um incremento no volume total de poros e um maior

refinamento da estrutura de poros, além de um maior consumo de portlandita, o que resultou em maior resistência à penetração dos íons agressivos.

Nos estudos desenvolvidos por O'Farrell *et al.* (1999, 2000), sobre a resistência ao ataque por sulfato de sódio e água do mar sintética em argamassas, verificaram que o resíduo de tijolos cerâmicos moídos como substituto parcial do cimento incrementou a resistência química destas argamassas.

Gonçalves (2005) conclui que argamassas contendo resíduo cerâmico possuem maior resistência ao ataque por sulfato de magnésio em relação à mistura de referência, sendo 10% o teor de substituição ao cimento que apresentou melhor desempenho.

Irassar & González (2000) estudaram a degradação por sulfato de sódio de argamassas com cimento resistente a sulfatos com baixo teor de  $C_3S$ , fazendo substituição de 10% e de 20% do cimento por fíler calcário. A adição de fíler calcário conduziu a um pior desempenho das argamassas em relação à resistência ao sulfato. Para a substituição de 20%, efeitos prejudiciais foram, principalmente, atribuídos ao incremento da porosidade capilar (cerca de 50% maior em relação à argamassa de referência) e à alta vulnerabilidade da portlandita na pasta. Para 10% de substituição, o incremento na porosidade capilar foi de 24%, porém o ataque por sulfato não foi muito significativo.

### **3. Programa experimental**

O programa experimental teve como objetivo a realização de ensaios de resistência mecânica, físicos e de durabilidade em concretos de resistência convencional com a incorporação de RCR e RBC. Para tanto, serão utilizados materiais convencionais como cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e superplastificante. A caracterização do RCR e do RBC foi realizada por Afonso (2005) e Costa (2006), respectivamente, que apresentaram as especificações necessárias para o seu uso. Os materiais utilizados neste estudo atenderam a estas recomendações. As principais características dos materiais e a metodologia dos ensaios são descritas a seguir.

#### **3.1. Materiais**

##### **3.1.1. Resíduo de corte de rochas (RCR)**

O RCR, que foi utilizado nos ensaios, é proveniente da região Noroeste Fluminense do estado do Rio de Janeiro, mais especificamente da Serraria Olho de Pombo (Figura 7), situada no município de Santo Antônio de Pádua. As características físico-químicas do RCR são apresentadas a seguir.

O RCR foi coletado no tanque de decantação e, desta forma, apresentou um alto teor de umidade. Para utilizá-lo, foi seco ao ar livre por 3 dias e, posteriormente, seco em estufa por 24 horas a uma temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  (Figura 8), resultando um material em forma de torrões. Após secagem, o material apresentou massa específica (NBR 6508, 1984) de  $2.710 \text{ kg/m}^3$ , próximo do valor observado para as rochas normalmente utilizadas na produção de brita. Geologicamente, a rocha foi classificada pelo RETECMIN/RJ como originária de um Milonito Gnaiss, oriundo do metamorfismo de rochas ígneas semelhantes a Gnaisses.



Figura 6 – Vista externa da Serraria Olho de Pombo, localizada no Município de Santo Antônio de Pádua - RJ



a) Secagem do RCR ao ar livre;



b) Secagem do RCR em estufa.

Figura 7 – Beneficiamento do resíduo de corte de rocha (RCR): (a) secagem ao ar livre; (b) secagem em estufa.

A determinação da composição química do RCR foi feita através da técnica de análise química por fluorescência de raios X de energia dispersiva (*EDX*), sob a condição de “vácuo dois canais” (Tabela 2).

Para homogeneizar o RCR, uma moagem foi efetuada em moinho de bolas tipo Sonnex, da marca Pavitest, em sua capacidade máxima de moagem de 14 kg, durante um período equivalente a 600 ciclos (aproximadamente 20 min). De acordo com Afonso (2005), o número de ciclos utilizados é o máximo recomendado, pois para maiores tempos de moagem não houve redução significativa no tamanho dos grãos. Após este

beneficiamento, o RCR (Figura 9), apresentou superfície específica Blaine (NBR NM 76, 1998) de 1512,9 m<sup>2</sup>/kg. Como o método Blaine não fornece valores totalmente confiáveis quando utilizado para determinação de superfícies específicas maiores que 500 m<sup>2</sup>/Kg, também foi utilizado o método BET (Brunauer, Emmett e Teller) com gás nitrogênio, obtendo uma superfície específica Multipoint BET de 4249 m<sup>2</sup>/kg (Afonso, 2005).

Tabela 2 - Composição química em termos de óxidos do RCR, % em massa.

Elementos	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	64,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,0
K <sub>2</sub> O	9,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,7
CaO	3,0
SO <sub>3</sub>	1,5
TiO <sub>2</sub>	0,8
Outros	0,3



Figura 8 - Resíduo de corte de rocha (RCR).

A Figura 9 mostra a curva granulométrica do RCR após 600 ciclos de moagem obtida de acordo com o procedimento da NBR 7181 (1984). O RCR obteve D<sub>50</sub> igual a 8µm. É importante destacar que o RCR apresentou todas as partículas com dimensões inferiores a 100µm.

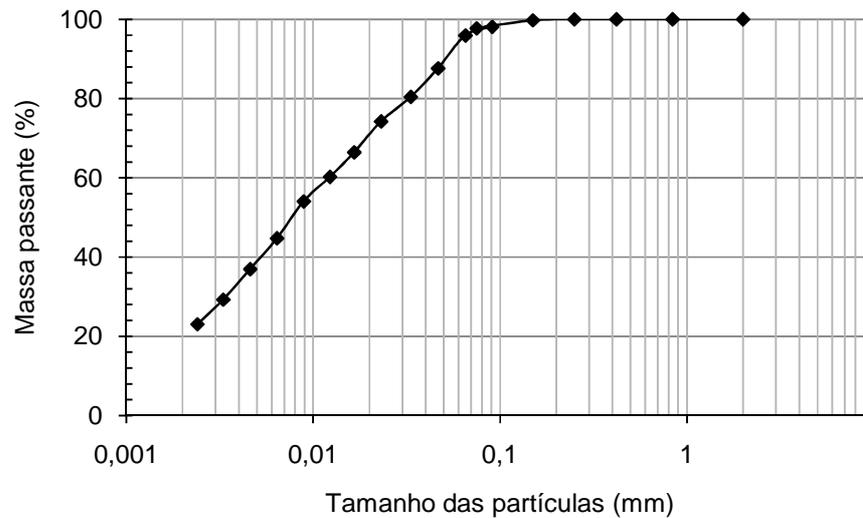


Figura 9 - Distribuição granulométrica do RCR após moagem.

A Figura 10 mostra o padrão de difração de raios X apresentado pelo resíduo de corte de rocha, onde as fases cristalinas identificadas foram: quartzo; albita; honoblenda; biotita; e microclina. A análise de raios X foi realizada no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ e sua metodologia está descrita no item 3.2.4.3.

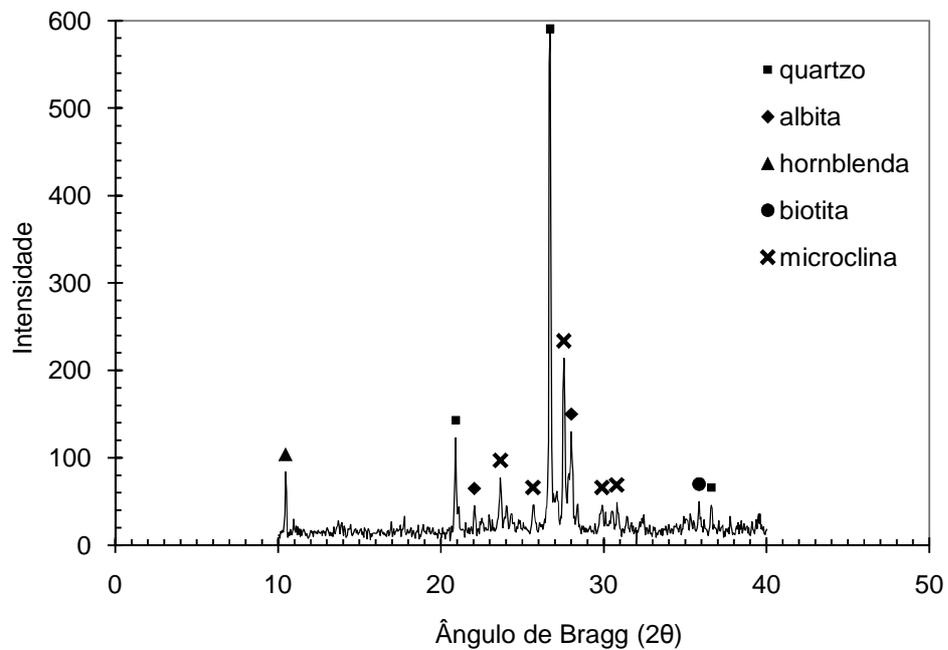


Figura 10 – Difratoograma de raios X do resíduo de corte de rocha (RCR).

A análise da periculosidade do RCR foi realizada conforme as prescrições da NBR 10004 (1987), permitiu enquadrar o RCR na classe III (inerte) (Afonso, 2005). Isto significa que o resíduo não apresenta risco à saúde, nem ao ambiente, quando manuseado e armazenado de forma adequada.

### 3.1.2. Resíduo de blocos cerâmicos moídos (RBC)

O RBC que foi coletado na região Norte do estado do Rio de Janeiro, mais especificamente em indústrias cerâmicas do município de Campos dos Goytacazes. Foram coletados resíduos no pátio de quatro fábricas distintas: A. C. Cerâmica (Figura 11), Cerâmica Cinco Estrelas, Cerâmica R. A. Gama e Cerâmica União (Figura 12). Segundo informações fornecidas pelas cerâmicas, a temperatura de queima dos blocos foi de, em média, 750°C.



Figura 11 – A.C. Cerâmica.



Figura 12 - Cerâmica União

Após o quarteamento, o resíduo foi cominuído em um britador de mandíbulas tipo Pulverisette® 1 da marca Fritsch (Figura 13). Após a britagem, o RBC ainda apresenta partículas com dimensão de 0,1 mm a 95 mm de diâmetro (Figura 14). Desta forma, o resíduo foi moído, no mesmo moinho de bolas onde foi moído o RCR, em bateladas de 14 kg, por 1800 ciclos, aproximadamente 1 hora (Figura 15). De acordo com estudos de tempo de moagem do RBC conduzidos por Costa (2006), este tempo

de moagem é razoável, já que a redução do tamanho das partículas não foi significativo para tempos de moagem maiores do que 1 hora.



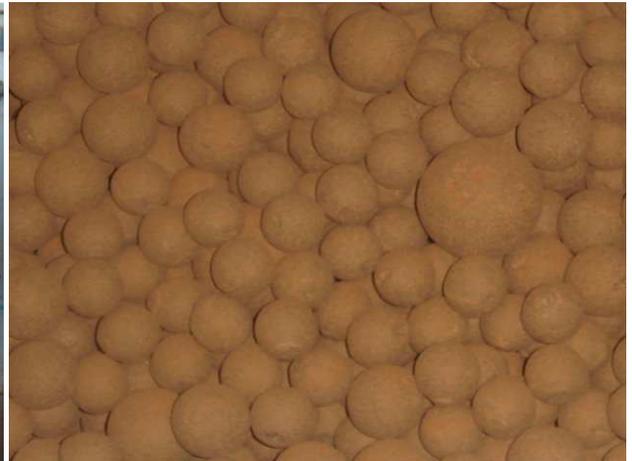
Figura 13 – RBC sendo cominuído no britador de mandíbulas.



Figura 14 - Aspecto do RBC após britagem.



(a)



(b)

Figura 15 – (a) Moinho de bolas e (b) detalhe do RBC com a carga moedora.

Após este beneficiamento, o RBC (Figura 16), apresentou uma massa específica de  $2.653 \text{ kg/m}^3$  (NBR 6508, 1984).



Figura 16 - Resíduo de blocos cerâmicos moídos (RBC).

Segundo Rocha *et al.* (2005), o RCB após 1 hora de moagem apresentou granulometria próxima a do RCR, como pode ser observado na Figura 17. O RBC apresentou  $D_{50}$  igual a  $10\mu\text{m}$ .

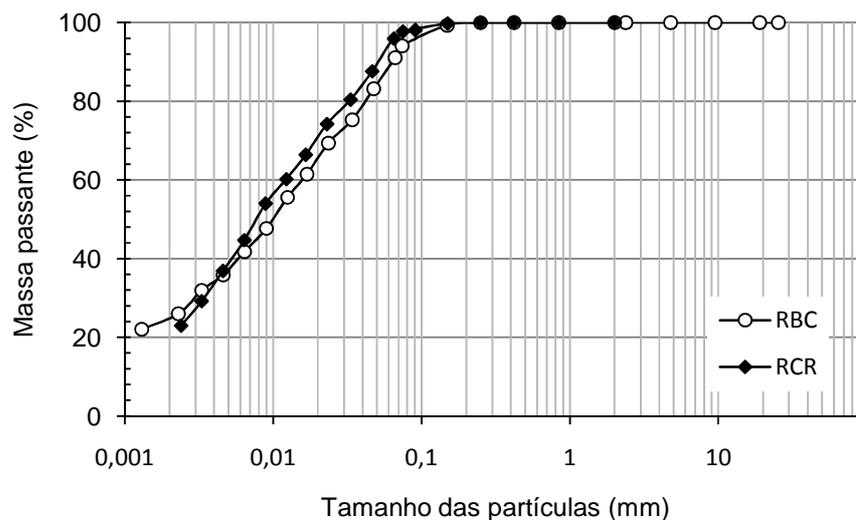


Figura 17 - Distribuição granulométrica do RBC e do RCR, após moagem.

A Tabela 3 apresenta a composição química do RBC, obtida por meio do EDX. O procedimento utilizado para esta determinação foi o mesmo empregado para a do RCR. A Figura 18 apresenta o difratograma de raios X do RBC, onde as fases cristalinas encontradas foram: quartzo; caulinita; e microclina. Assim como para o RCR a análise de raios X foi realizada no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ e sua metodologia está descrita no item 3.2.4.3.

Tabela 3 - Composição química em termos de óxidos do RBC, % em massa

Elemento	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	46,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,0
K <sub>2</sub> O	2,3
SO <sub>3</sub>	1,7
TiO <sub>2</sub>	1,7
Outros	0,6

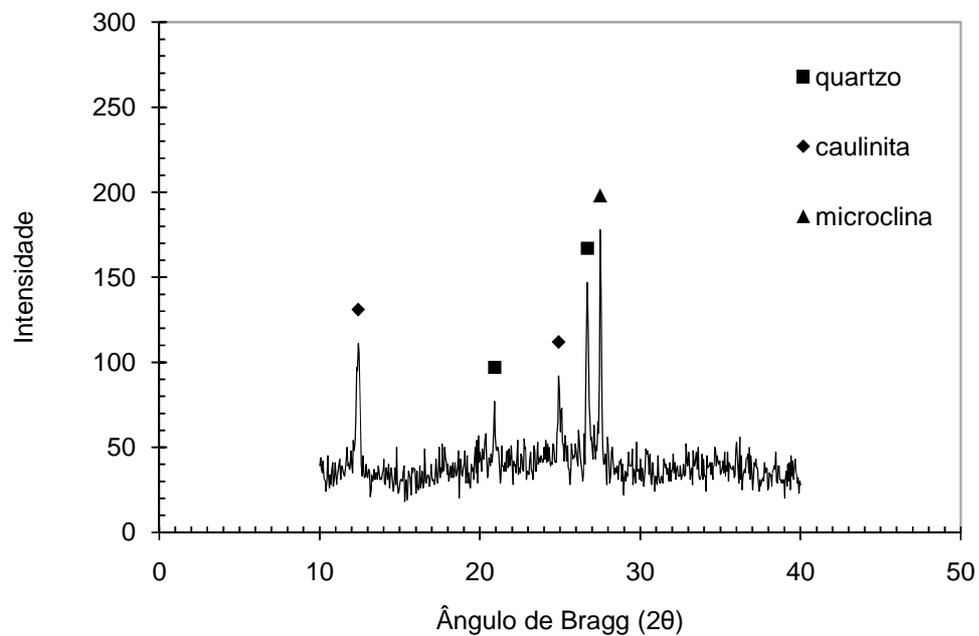


Figura 18 – Difratograma de raios X do resíduo de bloco cerâmico moído (RBC).

Costa (2006) determinou a atividade pozolânica de acordo com a NBR 5753 (1992) e NBR 5753 (1991) e concluiu que o RBC possui alguma atividade pozolânica.

### 3.1.3. Cimento

Em princípio qualquer cimento Portland pode ser empregado na produção de um concreto. Porém, como o objetivo principal do trabalho focaliza a investigação do efeito

da substituição do cimento por uma adição mineral (pozolânica) e adição de uma adição mineral (fíler), foi utilizado o cimento Portland CPP classe G (NBR 9831, 2006), que não contém nenhuma adição mineral suplementar além do gesso (utilizado como retardador da pega), que possibilita a avaliação mais precisa do efeito de tais resíduos na adição em concretos. O cimento apresentou massa específica de  $3.140 \text{ kg/m}^3$  e a Tabela 4 mostra a composição química do mesmo.

Tabela 4 - Composição química, em termos de óxidos do cimento Portland.

<b>Elemento</b>	<b>Quantidade (%)</b>
CaO	64,8
SiO <sub>2</sub>	20,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3
SO <sub>3</sub>	2,5
MgO	1,2
K <sub>2</sub> O	0,5
Na <sub>2</sub> O	0,2

#### 3.1.4. Superplastificante

Para manter constante o valor do abatimento dos concretos com adição de resíduos, sem alterar a relação água/material cimentício, foi utilizado um aditivo superplastificante. Neste estudo foi empregado um aditivo superplastificante de terceira geração, com base em uma cadeia de policarboxilato modificado, sendo isento de cloretos. Com este aditivo é possível obter um concreto fluido com grande redução da quantidade de água, pois além do mecanismo de dispersão eletrostática apresentado pelos aditivos das gerações anteriores, as cadeias laterais unidas à estrutura polimérica geram uma energia que estabiliza a capacidade de retração e dispersão das partículas de cimento (Freitas Jr., 2005). A Figura 19 apresenta a adsorção das moléculas de superplastificante sobre a superfície do cimento. A Tabela 5 mostra as características do superplastificante utilizado.

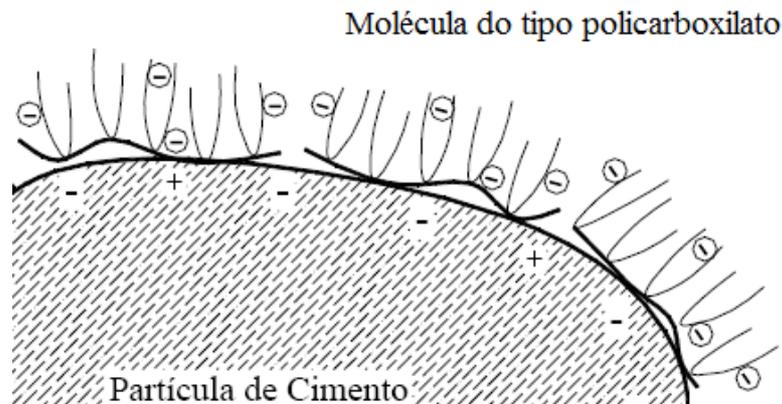


Figura 19 – Adsorção das moléculas de dispersante sobre a superfície do cimento (Fomagini, 2005).

Tabela 5 – Características do superplastificante.

<b>Características do Superplastificante</b>	
Tipo	Policarboxilato
pH	6 a 7
Densidade	1.200 kg/m <sup>3</sup>
Teor de sólidos	32,6%

### 3.1.5. Outros materiais

O agregado miúdo utilizado foi uma areia de rio quartzosa lavada. De acordo com a NBR 7211 (2005), o agregado em questão pôde ser classificado como areia fina (zona 2), com módulo de finura de 1,95 e dimensão máxima característica de 2 mm. Essas características encontram-se descritas na Tabela 6, que apresenta, ainda, a massa específica.

O agregado graúdo foi uma brita granítica fornecida por uma pedreira da região, classificado como brita 1 (9,5 a 19 mm) de acordo com os critérios estabelecidos na NBR 7211 (2005). A Tabela 7 mostra as características granulométricas e física da brita.

Tabela 6 – Características granulométricas e física da areia.

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Percentual retido</b>	<b>Características granulométricas</b>	
4,75	0,5	Dimensão máxima	2 mm
2,36	1,1	Módulo de Finura	1,95
2,00	0,6	Classificação	Fina
1,18	5,2		
0,85	6,9		
0,60	10,6		
0,36	28,8		
0,30	13,3		
0,21	23,1		
0,15	3,2	<b>Característica Física</b>	
0,08	6,5		
Fundo	0,2	Massa específica	2.620 kg/m <sup>3</sup>

Tabela 7 – Características granulométricas e física da brita.

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Percentual retido</b>	<b>Características granulométricas</b>	
76,00	0,0	Dimensão máxima	19 mm
38,00	0,0	Módulo de Finura	6,93
25,00	0,0		
19,00	1,9		
12,50	59,0		
9,50	30,4		
4,75	8,6	<b>Característica Física</b>	
2,36	0,1		
Fundo	0,0	Massa específica	2.570 kg/m <sup>3</sup>

A água utilizada na confecção dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ.

### 3.2. Métodos

O programa experimental foi elaborado visando o estudo da influência das adições minerais RCR e RBC nas propriedades de concretos submetidos aos ensaios de resistência mecânica e de durabilidade. O programa experimental está resumido nas etapas mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo do programa experimental.

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
1	Dosagem dos concretos.
2	Produção e cura dos concretos.
3	Ensaio físicos e de durabilidade: <ul style="list-style-type: none"> <li>• absorção por imersão;</li> <li>• absorção por sucção capilar;</li> <li>• penetração acelerada de íons cloreto;</li> <li>• permeabilidade a gás;</li> <li>• ataque por sulfato de magnésio.</li> </ul>
	Ensaio mecânicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• resistência à compressão e módulo de elasticidade;</li> <li>• resistência à tração na flexão;</li> <li>• resistência à tração por compressão diametral.</li> </ul>
4	

Os corpos-de-prova foram dosados e produzidos no LECIV/UENF. Os ensaios de resistência mecânica e durabilidade foram realizados no LABEST/COPPE/UFRJ, dentro do projeto de cooperação acadêmica (CAPES/PROCAD) existente entre as duas instituições.

#### 3.2.1. Dosagem dos concretos

A dosagem do concreto de referencia foi realizada por Cordeiro (2006), com base no modelo de empacotamento compressível, desenvolvido por De Larrard (Cordeiro, 2006).

Foram feitas quatro misturas, o concreto de referência, CREF, foi dosado visando uma resistência à compressão aos 28 dias de 25 MPa e um abatimento de 150

± 20 mm. Já a dosagem dos concretos com resíduos levou em consideração as características dos dois resíduos empregados. No concreto CRCR foram adicionados 10% de RCR sobre a massa de cimento. No concreto CRBC, por sua vez, 20% da massa original de cimento Portland foram substituídas por RBC. O concreto CRCR/RBC foi confeccionado com substituição de 20% da massa original de cimento pelo RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício (cimento + RBC). A Tabela 9 mostra a composição das misturas. Os detalhes sobre a dosagem da água e do superplastificante serão mostrados no item 4.1.

Tabela 9 - Composição dos concretos.

Misturas	Proporção dos materiais (em massa)						Materiais (kg/m <sup>3</sup> )						
	Cimento	RCR	RBC	Areia	Brita	Água	Cimento	RCR	RBC	Areia	Brita	Água	SP
CREF	1,00	-	-	1,98	2,74	0,60	365,9	-	-	724,7	1001,0	219,5	-
Concretos com correção do abatimento com água													
CRCR	1,00	0,10	-	1,98	2,74	0,63	332,6	33,3	-	658,8	910,0	208,2	-
CRBC	0,80	-	0,20	1,98	2,74	0,72	292,7	-	73,2	724,7	1001,0	264,5	-
CRCR/RBC	0,80	0,10	0,20	1,98	2,74	0,72	265,5	33,3	66,5	658,8	910,0	240,5	-
Concretos com correção do abatimento com superplastificante													
CRCR	1,00	0,10	-	1,98	2,74	0,60	332,6	33,3	-	658,8	910,0	199,6	0,26
CRBC	0,80	-	0,20	1,98	2,74	0,60	292,7	-	73,2	724,7	1001,0	219,5	1,00
CRCR/RBC	0,80	0,10	0,20	1,98	2,74	0,60	265,5	33,3	66,5	658,8	910,0	199,7	1,27

\* Valores referentes à relação entre massas de superplastificante (sólidos) e de material cimentício (cimento +RBC).

### 3.2.2. Produção e cura dos concretos

Os concretos foram produzidos , no LECIV, em um misturador planetário forçado com capacidade de 120 litros (Figura 20). A Tabela 10 apresenta a ordem de colocação dos constituintes no misturador e os tempos de mistura, enquanto a Figura 21 ilustra a produção de um concreto CRBC.



Figura 20 – Misturador planetário.

Tabela 10 - Ordem de colocação e tempos de mistura dos materiais no misturador.

<b>Etapa</b>	<b>Tempo (s)</b>
Cimento e adição mineral	30
Agregado graúdo e 70% da água	60
Areia e 30% da água	180
Parada	60
Aditivo superplastificante*	10
Mistura final	30
<b>Tempo total</b>	<b>360 (6 min)</b>

\*Apenas nas misturas com superplastificante



Colocação do cimento.



Colocação do RBC.



Homogeneização do cimento com o resíduo.



Colocação da brita e 70% da água.



Mistura.



Adição da areia.



Mistura final.

Figura 21 – Etapas da produção dos concretos.

A consistência do concreto foi determinada por meio do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998), realizada em torno de 2 min, após o fim da mistura. O adensamento mecânico dos corpos-de-prova foi realizado em uma mesa vibratória com frequência de 60 Hz (Figura 22), com moldagem em três camadas para os corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) e em duas camadas para os corpos-de-prova prismáticos (75 mm x 75 mm x 285 mm) e tempo de vibração de 1 min por camada. Posteriormente, os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 h. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram imersos em tanque de cura com água saturada com cal (Figura 23), onde permaneceram até a idade dos ensaios.



Adensamento dos corpos-de-prova  
cilíndricos.



Adensamento dos corpos-de-prova  
prismáticos.

Figura 22 – Adensamento dos concretos em mesa vibratória.



Figura 23 – Tanque de cura com corpos-de-prova e água saturada com cal.

### 3.2.3. Ensaios mecânicos

#### 3.2.3.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A resistência à compressão dos concretos foi avaliada através da ruptura de 3 corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura), para cada mistura e idade, em prensa servo-controlada Shimadzu, modelo UH-F1000kNI (Figura 24) de acordo com as prescrições da NBR 5739 (1994) com velocidade de carregamento de 0,0075 mm/min. O comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com emprego de transdutores elétricos para medição dos deslocamentos longitudinais. O cálculo do módulo de elasticidade secante, conforme NBR 8522 (2003), foi realizado de acordo com a Equação 7. Os corpos-de-prova de concreto foram capeados com enxofre para a obtenção de superfícies planas e paralelas entre si. Tanto o capeamento, quanto a ruptura dos corpos-de-prova foram realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000kNI; (b) corpo-de-prova com transdutores elétricos.

A idade de ruptura dos corpos-de-prova foi de 42 e 170 dias. Inicialmente, a primeira idade de ruptura dos corpos-de-prova seria de 28 dias. Porém, devido a alguns problemas de transporte, já que este ensaio foi executado na COPPE/UFRJ, só foi possível a realização dos ensaios aos 42 dias.

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (7)$$

Sendo:

$E$ : módulo de elasticidade secante;

$\sigma_1$ : tensão correspondente à deformação de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\sigma_2$ : tensão correspondente à 30% da tensão máxima;

$\varepsilon_1$ : deformação de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_2$ : deformação correspondente à tensão  $\sigma_2$ .

### 3.2.3.2. Resistência à tração

#### 3.2.3.2.1. Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos foram realizados em uma prensa de ensaios Wykeham Farrance com célula de carga de 200 kN, no Laboratório de Estruturas/COPPE/UFRJ, em corpos-de-prova prismáticos de (50 x 50 x 180) mm extraídos de corpos-de-prova de (75 x 75 x 285) mm e de acordo com a NBR 12142 (1991) (Figura 25). Para cada mistura foram ensaiados 3 corpos-de-prova com idade de 60 dias. Os ensaios foram realizados com o controle de deslocamento de travessão a uma taxa de 0,1 mm/min. A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação 8.

$$f_{ctm} = \frac{pl}{bd^2} \quad (8)$$

Sendo:

$f_{ctm}$ : resistência à tração na flexão, MPa;

$p$ : carga máxima aplicada, em N;

$l$ : distância entre cutelos de suporte, em mm;

*b*: largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm;  
*d*: altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm.



Figura 25 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão.

### **3.2.3.2.2. Resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio de tração por compressão diametral, proposto pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro em 1943 (NBR 7222, 1994), apresenta-se como alternativa para se estimar a resistência à tração devido à facilidade de execução. O ensaio consiste, basicamente, na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico (estado plano de deformação).

Os ensaios foram executados em prensa Shimadzu UH-F1000kNI com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min de acordo com os procedimentos da NBR 7222 (1994) (Figura 25). Foram ensaiados 4 corpos-de-prova para cada mistura com idade de 42 dias. Os corpos-de-prova possuíam a forma de discos de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura obtidos pelo corte da região central de cilindros de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os discos foram posicionados na prensa com auxílio de mordentes de aço. Entre as partes do mordente e o corpo-de-prova foram colocadas tiras de madeira de comprimento igual à geratriz do disco, largura de 10 mm  $\pm$  1 mm e

espessura de  $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , conforme especificação da NBR 10024 (1987). A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 9.

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \quad (9)$$

Em que:

$\sigma_t$ : resistência à tração por compressão diametral;

$F_r$ : carga de ruptura;

$D$ : diâmetro do corpo-de-prova;

$L$ : espessura do corpo-de-prova.



Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

### 3.2.4. Ensaio físicos e de durabilidade

#### 3.2.4.1. Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade (Figura 27) foi realizado seguindo as prescrições da NBR 9779 (1995). Neste caso o corpo-de-prova é imerso em uma lâmina de água de  $5 \pm 1 \text{ mm}$  acima da face inferior. A absorção é monitorada pelo ganho

de massa no tempo. Foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura), com idade de 63 dias no início do ensaio, para cada concreto. Todos os corpos-de-prova foram selados lateralmente a partir bordo inferior até a metade da altura com fita adesiva impermeável para impedir a evaporação da água. A absorção de água por capilaridade foi calculada com a Equação 10.

$$A_c = \frac{M_c - M_s}{A_e} \quad (10)$$

Sendo:

$A_c$ : absorção de água por capilaridade;

$M_c$ : massa do corpo-de-prova que permanece em contato com a água durante um período de tempo especificado;

$M_s$ : massa do corpo-de-prova seco em estufa;

$A_e$ : área da seção transversal do corpo-de-prova.

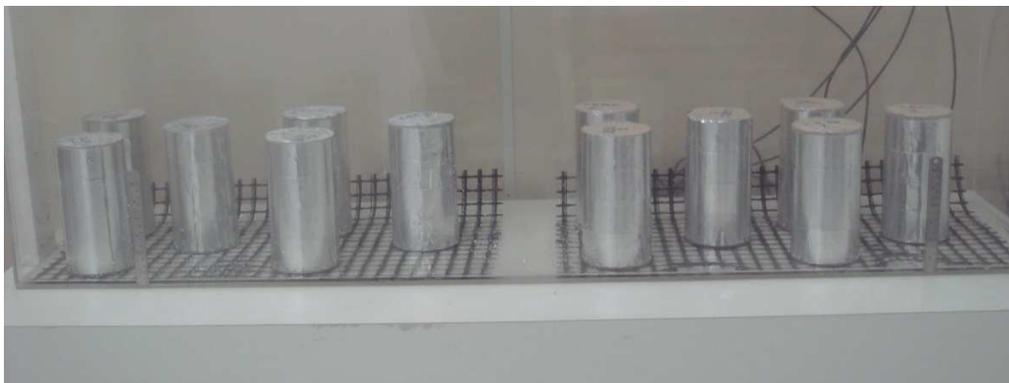


Figura 27 – Ensaio de absorção por capilaridade.

#### 3.2.4.2. Absorção por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão (Figura 28) foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 9778 (1987). Os parâmetros avaliados neste ensaio foram à absorção total (Equação 11) e o índice de vazios (Equação 12),

que estão associados ao volume total de poros acessíveis à água. Portanto, a facilidade com que a água pode penetrar no concreto (permeabilidade) não é determinada. Além do índice de vazios e a absorção total, o ensaio de absorção permite a determinação da massa específica do concreto (Equação 13) da matriz no estado endurecido. Foram utilizados 2 corpos-de-prova (100 mm de diâmetro e 50 mm de altura), todos os concretos com idade de 48 dias no início do ensaio.



Figura 28 – Ensaio de absorção por imersão.

$$A_c = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (11)$$

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (12)$$

$$\delta = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (13)$$

Sendo:

$A_c$ : absorção de água por imersão;

$M_{sat}$ : massa, em g, do corpo-de-prova saturado em água com superfície seca;

$M_s$ : massa, em g, do corpo-de-prova seco em estufa;

$I_v$ : índice de vazios;

$\delta$ : massa específica real;

$M_i$ : massa, em g, do corpo-de-prova, saturado e imerso em água.

### 3.2.4.3. Ataque por sulfato de magnésio

De acordo com Gonçalves (2005), os principais parâmetros para avaliação da intensidade do ataque promovido por sulfatos aos concretos são: variação da resistência mecânica, variação dimensional, variação de massa, alteração na estrutura de poros, alterações no módulo de elasticidade e aspecto visual. Neste trabalho foi avaliada a perda da resistência à tração na flexão dos concretos nas idades de referência (28 dias), aos 88 dias e aos 148 dias, ou seja, 60 e 120 dias de exposição ao ataque, respectivamente. Para a avaliação da perda da resistência à tração na flexão foram utilizados 3 corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm para cada mistura, de acordo com o procedimento descrito no item 3.2.3.1.

Os corpos-de-prova foram imersos numa solução com concentração de 10% de sulfato de magnésio, preparada conforme a ASTM C 1012 (1995), em ciclos de imersão na solução (10 dias) e secagem ao ar livre (10 dias). O pH da solução foi monitorado durante todo o tempo de exposição. A ASTM C 1012 (1995) estabelece que o pH da solução deva estar situado entre 6,0 e 8,0. A solução foi renovada quando o pH da solução extrapolou os valores limites especificados ou quando completou 60 dias. Os corpos-de-prova de referência (não submetidos ao ataque) foram imersos em uma solução de controle (água).

A deterioração dos concretos foi avaliada com a determinação do dano de resistência à tração (DRT), como definido por Lee *et al.* (2004) *apud* Gonçalves (2005) e calculado conforme a Equação 14:

$$DRT(\%) = \frac{ft_r - ft_s}{ft_r} \times 100 \quad (14)$$

em que:

$DRT$ : dano de resistência à tração (%);

$ft_r$ : resistência à tração na flexão da mistura imersa na solução de referência (MPa);

$f_{ts}$ : resistência à tração na flexão da mistura imersa na solução de sulfato de magnésio (MPa), na mesma idade da avaliação.

Para melhor compreender as reações causadas pela exposição ao ataque por sulfato de magnésio foram confeccionadas duas pastas para o emprego da técnica de difração de raios X, visando à identificação dos compostos cristalinos formados. A pasta de referência (água e cimento) foi confeccionada com a mesma relação água/cimento do concreto de referência, 0,60. A outra pasta, com resíduos, assim como o concreto CRCR/RBC, foi confeccionada com 20% de substituição do cimento pelo RBC e 10% de adição de RCR sobre a massa de material cimentício, com relação água/material cimentício de 0,72.

As pastas foram confeccionadas em uma argamassadeira da marca Emic com capacidade de 5 litros de acordo com o seguinte procedimento: mistura dos constituintes sólidos e água no misturador por 2 min na velocidade baixa; parada de 30 s; mistura final por 2 min na velocidade alta; moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura); após 24 horas desmoldagem e imersão em água saturada com cal até as idades dos ensaios.

Para cada mistura foram confeccionados 2 corpos-de-prova e nas idades de avaliação foram retiradas amostras (fragmentos de aproximadamente 10g) que foram moídas em almofariz de porcelana. Para maior controle do tempo de reação, efetuou-se a interrupção da hidratação pela remoção do excesso de água livre das amostras. O processo de remoção da água livre consistiu em: imersão em acetona P. A.; secagem com álcool etílico P. A.; secagem em estufa a 60°C por aproximadamente 1 hora; acondicionamento em filme plástico e manutenção em dessecador até a realização do ensaio.

As difrações de raios X foram realizadas em amostras com idade de 28 dias e 148 dias, ou seja, 120 dias de exposição ao sulfato em ciclos de imersão (10 dias) e secagem (10 dias).

As análises de difração de raios X foram efetuadas no Laboratório Estrutura da COPPE/UFRJ. Foi utilizado um difratômetro de Focus da Bruker, com as amostras em pó. As condições de exposição foram: radiação de cobre ( $\text{CuK}\alpha$ ); tensão de 30 Volts;

corrente de 40 microAmpère; varredura de  $10^{\circ} \leq 2\theta \leq 60^{\circ}$ ; passo de 0,05°; e tempo de aquisição de 1s.

#### 3.2.4.4. Penetração acelerada de íons cloreto

O método mais utilizado para determinar o comportamento do concreto em relação ao ingresso de íons cloreto é o normatizado pela ASTM C 1202 (1997), principalmente por possuir uma metodologia simples e de fácil execução. Este método relaciona a capacidade de penetração iônica com a condutância elétrica passante através de um disco de concreto durante um determinado intervalo de tempo. A condutância é expressa em carga elétrica e seu valor é utilizado para classificar o concreto segundo os critérios apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação da penetração de íons cloreto com base na carga total passante (ASTM C 1202, 1997).

<b>Carga total passante (C)</b>	<b>Penetração de íons cloreto</b>
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

O ensaio (Figura 29) consiste em acoplar um corpo-de-prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura entre duas meia-células de acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3 N, e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração (em massa). Entre as duas células é gerada uma diferença de potencial de  $60 \pm 0,1$  V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. O ensaio tem duração de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de 30 minutos por meio de um amperímetro digital. O produto da corrente pelo tempo, expresso em Coulomb, indica a carga total que atravessa o corpo-de-prova e revela uma maior ou menor resistência do concreto à

penetração dos íons cloreto. A carga total passante nos corpos-de-prova é calculada pela Equação 15:

$$Q = 900[I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}] \quad (15)$$

Sendo:

$Q$ : carga total passante, em Coulomb;

$I_0$ : corrente imediatamente após a aplicação da diferença de potencial, em Ampères;

$I_t$ : corrente em  $t$  minutos depois da diferença de potencial ser aplicada, em Ampères.



Figura 29 – Configuração do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto.

O ensaio foi realizado utilizando-se 2 corpos-de-prova saturados com água com água deionizada, na idade de 48 dias. Os corpos-de-prova possuíam 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, e foram seccionados de corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada mistura aos 48 dias de idade.

#### 3.2.4.5. Ensaio de permeabilidade a gás

Apesar da importância da determinação da permeabilidade, não há uma padronização do ensaio. Um dos métodos mais simples e rápido para a medição direta

da permeabilidade é a técnica de aplicação do diferencial de pressão usando um fluido, a partir do modelo da Lei de Darcy.

O ensaio de permeabilidade a gás foi conduzido utilizando-se um permeâmetro a gás do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, similar ao desenvolvido por Cabrera e Lynsdale (1988). Os ensaios foram realizados com gás nitrogênio, de acordo com os procedimentos estabelecidos por Grube e Lawrence (1988), utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura (estes corpos-de-prova foram seccionados de corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, normalmente utilizados para o ensaio de resistência à compressão), com idade de 48 dias. A expressão empírica utilizada para calcular a permeabilidade intrínseca a gás é dada pela Equação (16). O coeficiente de permeabilidade é calculado pela Equação (17).

$$K = \frac{2P_2QL\eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (16)$$

$$k = \frac{K\rho g}{\eta} \quad (17)$$

Sendo:

$K$ : permeabilidade intrínseca (m<sup>2</sup>);

$P_1$  e  $P_2$  são as pressões superior e inferior (MPa), respectivamente, assumiu-se  $P_2 = 1$  bar;

$Q$ : fluxo (m<sup>2</sup>/s)

$L$ : espessura do corpo-de-prova;

$\eta$ : viscosidade do gás (Ns/m<sup>2</sup>), a 20°C a viscosidade do gás nitrogênio é de 1,747E-05 Ns/m<sup>2</sup>;

$A$ : área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$k$ : coeficiente de permeabilidade (m/s);

$\rho$ : densidade do nitrogênio;

$g$ : aceleração da gravidade.

A Figura 30 mostra o permeômetro a gás, que foi confeccionado em aço inox e possui capacidade para suportar uma pressão interna de 0,5 MPa. Este equipamento está limitado ao ensaio de corpos-de-prova de concreto com diâmetro de 100 mm e espessura entre de 10 mm e 50 mm. Os corpos-de-prova são envolvidos lateralmente com uma borracha de silicone, produzida especialmente para esta aplicação, cuja finalidade é impedir a passagem do gás pela sua lateral (Figura 31). Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada mistura aos 48 dias de idade.



Figura 30 – Permeômetro a gás



Figura 31 – Corpo-de-prova, para o ensaio de permeabilidade a gás, encaixado no anel de borracha de silicone.

O ensaio consiste em aplicar valores de pressão (entre 0,04 MPa e 0,5 MPa) e medir a respectiva vazão do gás que flui através da seção transversal do corpo-de-prova. Antes de cada ensaio, os corpos de prova foram secos em estufa por um período mínimo de 36 horas à temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  para que toda a água em seu interior fosse eliminada. Depois de retirados da estufa os corpos-de-prova, foram colocados em dessecador até a estabilização da temperatura. Após o ajuste do corpo-de-prova na célula, diferentes valores de pressão foram aplicados. Depois de 15 min para a estabilização do fluxo (Grube e Lawrence, 1988), a vazão de gás foi estimada pela determinação do tempo necessário para uma bolha de ar percorrer um trecho

equivalente a x ml em uma pipeta graduada e calibrada. As medidas foram efetuadas após 15 min de fluxo intermitente.

### **3.3. Análise estatística dos resultados experimentais**

Os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, e absorção por capilaridade, foram tratados estatisticamente por análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade, seguido pelo teste de Tukey, com auxílio do programa computacional Origin 8. Os resultados são apresentados na íntegra no Anexo A.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Consistência dos concretos

Nesta pesquisa, adotou-se o abatimento de  $150 \pm 20$  mm para concretos com consistência úmida, para aplicação em estruturas correntes sem grande responsabilidade e com adensamento manual, por ser este tipo de concreto o mais utilizado em Campos dos Goytacazes e região.

O concreto de referência foi dosado com relação água/cimento de 0,60. A Tabela 12 e a Figura 32 apresentam os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone. A utilização de resíduos nos concretos CRCR, CRBC e CRCR/RBC comprometeu a consistência dos concretos de tal forma que a redução do abatimento foi de 67, 97 e 100%, respectivamente, em relação ao concreto CREF. No caso da adição de RCR este fato também foi observado por vários autores (Faganello *et al.*, 2006; Gonçalves, 2000; Shumacher *et al.*, 2007; Quebaud *et al.*, 2006) que atribuíram a redução da consistência devido ao aumento de finos na mistura.

Já no caso da substituição de parte do cimento pelo RBC, a redução no abatimento também foi observada por Vieira (2005) em concretos com vários teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico. A menor trabalhabilidade das misturas foi ocasionada pela maior demanda de água necessária para envolver os grãos mais finos do resíduo cerâmico. Além disso, segundo Gallias *et al.* (2000), as partículas de formato irregular de adições do tipo metacaulim criam estruturas de baixa densidade com a alta necessidade hídrica.

Tabela 12 – Abatimento do tronco de cone dos concretos CREF, CRCR, CRBC e CRCR/CRBC.

Misturas	Abatimento (mm)
CREF	150
CRCR	50
CRBC	5
CRCR/RBC	0



a) CREF



b) CRCR



a) CRBC



b) CRCR/RBC

Figura 32 – Abatimento de tronco de cone dos concretos: (a) CREF, (b) CRCR, (c) CRBC e (d) CRCR/RBC.

Com a adição e substituição do cimento pelos resíduos, os valores de abatimento obtidos alteraram as características do concreto descritas na Tabela 1, o que impossibilitaria a aplicação do adensamento manual na aplicação destes concretos em estruturas. Devido a pouca trabalhabilidade e dificuldade de moldagem dos corpos-de-prova das misturas com resíduos, optou-se por manter o abatimento em  $150 \pm 20$  mm e avaliar dois tipos de correção: com água, por ser o método mais simples e econômico para um concreto de 25 MPa; e com superplastificante, apenas para a verificação do comportamento mecânico dos concretos com resíduos sem a interferência da variável água/material cimentício.

#### 4.1.1. Concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água

Nestes concretos foram adicionadas pequenas quantidades de água até se obter a consistência desejada de  $150 \pm 20$  mm. Para o CRCR foi adicionado mais 4% de água e para o CRBC e o CRCR/RBC mais 20% de água, em relação ao CREF. As novas relações água/material cimentício e os valores de abatimento para cada mistura são apresentados na Tabela 13.

Quando se adicionou o RCR no concreto com relação água/cimento 0,60, o abatimento foi reduzido necessitando de correção. Já no concreto CRBC com relação água/material cimentício 0,72, quando foi adicionado RCR (concreto CRCR/RBC), houve manutenção do abatimento de  $150 \pm 20$  mm, sem necessidade de correção.

Tabela 13 – Abatimento do tronco de cone e relação água/material cimentício dos concretos com correção com água.

Misturas	Abatimento (mm)	Relação a/mc
CREF	150	0,60
CRCR	170	0,63
CRBC	140	0,72
CRCR/RBC	150	0,72

#### 4.1.2. Concretos com correção do abatimento com superplastificante

Nestas moldagens manteve-se a relação água/material cimentício em 0,60 e adicionou-se superplastificante às misturas de forma que elas obtivessem o mesmo abatimento da mistura de referência ( $150 \pm 20$  mm). Os teores de superplastificante adicionados e os abatimentos de tronco de cone obtidos são mostrados na Tabela 14.

Diferente do concreto CRCR/RBC com correção do abatimento com água, quando houve correção do abatimento com superplastificante no concreto CRCR/RBC a quantidade de superplastificante utilizada foi maior que para o concreto CRBC. Logo pôde-se concluir que para relação água/material cimentício de 0,60, a adição de 10% CRCR no concreto, reduz o abatimento de tronco de cone, já para relação água/cimento 0,72 a adição de 10% de RCR não influencia no abatimento. Na Figura 33 é mostrado o abatimento das misturas com resíduos e adição de superplastificante.



a) CRCR

b) CRBC



c) CRCR/RBC

Figura 33 – Abatimento de tronco de cone dos concretos corrigidos com superplastificante: (a) CRCR, (b) CRBC e (c) CRCR/RBC.

Tabela 14 – Abatimento do tronco de cone e quantidade de superplastificante utilizada.

Misturas	Abatimento (mm)	Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )*
CREF	150	-
CRCR	170	0,26
CRBC	150	1,00
CRCR/RBC	150	1,27

\* Valores referentes à relação entre massas de superplastificante (sólidos) e de material cimentício (cimento + RBC).

## 4.2. Propriedades no estado endurecido dos concretos com correção do abatimento com água

### 4.2.1. Ensaios físicos e de durabilidade

#### 4.2.1.1. Absorção total, índice de vazios e massa específica real

O ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 1987) permite avaliar a absorção total, o índice de vazios e a massa específica real através das equações descritas no item 3.2.4.2, que estão associadas ao volume total de poros acessíveis à água na matriz. A Figura 34 apresenta absorção total dos concretos estudados. Os valores de absorção aumentaram 21% para o CRCR, 44% para o CRBC e 53% para o CRCR/RBC, todos em relação ao concreto de referência. A partir destes valores pode-se dizer que os valores de absorção foram maiores nas misturas com adição de resíduos e com maior relação água/material cimentício; a mesma tendência foi observada para os valores de índice de vazios (Figura 35) que aumentaram 19% para o CRCR, 40% para o CRBC, e 47% para o CRCR/CRBC, em relação ao CREF.

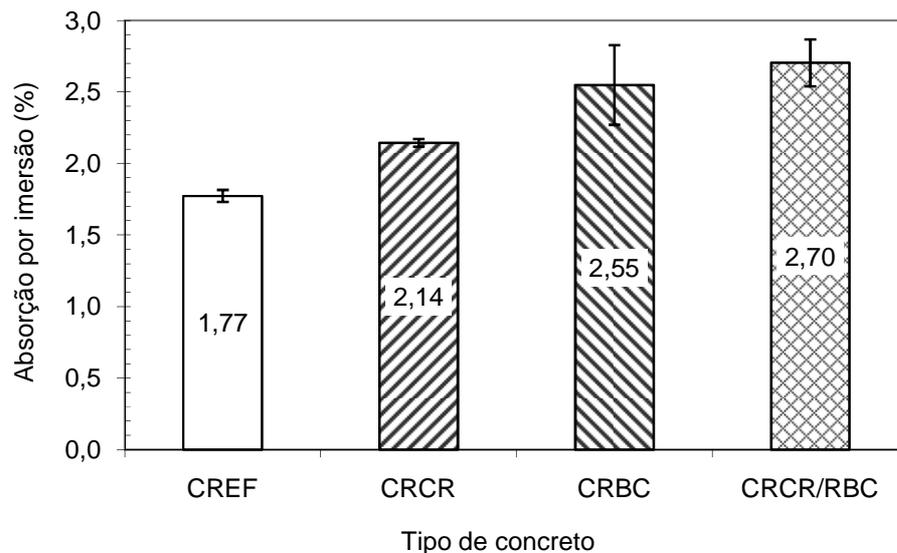


Figura 34 – Absorção por imersão dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.

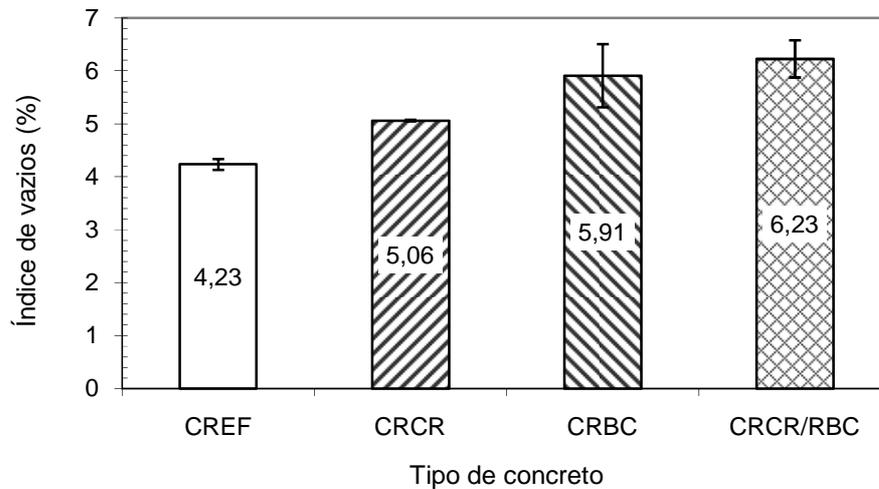


Figura 35 – Índice de vazios dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.

Já os valores de massa específica ilustrada na Figura 36, são reduzidos nos concretos que contêm resíduos e com maior relação água/material cimentício. Esta redução de massa específica real foi de apenas 0,3% para o CRCR, 1,2% para o concreto RBC e 1,5% para o concreto CRCR/RBC em relação ao CREF. A redução na massa específica real nos concretos com resíduos ocorreu devido a dois fatores. O primeiro devido as massas específicas dos resíduos serem menores que a massa específica do cimento, já que o cimento possui massa específica de  $3.140 \text{ kg/m}^3$ , o RCR de  $2.710 \text{ kg/m}^3$  e RBC de  $2.650 \text{ kg/m}^3$ . No concreto CRCR os grãos de RCR algumas vezes ocupam o lugar de grãos de cimento, e já que sua massa específica é menor isso reduz a massa específica do concreto. No concreto CRBC como há substituição do cimento por um material com massa específica menor, a massa específica do concreto conseqüentemente é reduzida. E no concreto CRCR/RBC há efeito conjunto do que acontece no CRCR e CRBC, reduzindo ainda mais a massa específica deste concreto. O segundo fator que justifica a redução nos valores de massa específica real dos concretos com resíduos consiste no aumento do índice de vazios provavelmente devido a maior relação água/material cimentício. A massa específica, no caso do concreto, é inversamente proporcional ao índice de vazios. Porém, não se pôde quantificar a influência da massa específica dos resíduos e do

aumento do índice de vazios na redução da massa específica dos concretos com resíduos.

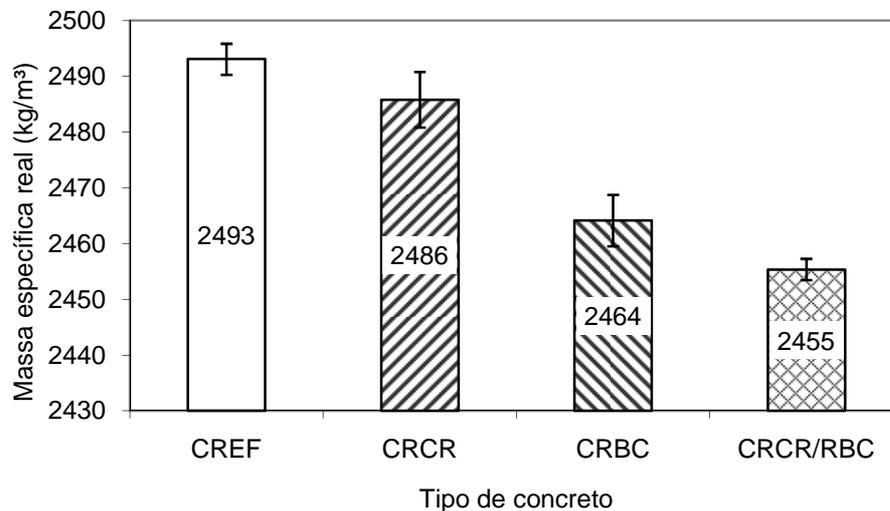


Figura 36 – Massa específica real dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.

Provavelmente, os resultados obtidos para os concretos com adição de resíduos foram mais influenciados pela maior relação água/material cimentício do que pela adição de resíduos, pois Gonçalves (2005) avaliou a porosidade por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio e pelo índice de vazios em concretos com substituição, em massa, de 20% de cimento por resíduo cerâmico e com relação água/material cimentício de 0,38, 0,50 e 0,62, e concluiu que o resíduo cerâmico praticamente não provocou variação nestes parâmetros. Além disso, Gonçalves (2000) e Toralles-Carbonari *et al.* (2004) avaliaram a absorção total em concretos com incorporação de 10% de pó-de-pedra e com relação água/material cimentício de 0,30 e 0,40, 0,50 e 0,70, respectivamente, e concluíram que os valores de absorção total nos concretos com adição foram inferiores ao do concreto de referência.

#### 4.2.1.2. Absorção por sucção capilar e absorvidade

A Figura 37 apresenta os resultados de absorção de água por capilaridade após 72 horas de contato água-concreto, segundo a NBR 9779 (1995). A absorção capilar,

conforme estabelecida por esta NBR, fornece apenas a quantidade de água absorvida por unidade de área do corpo-de-prova, após 72 horas, e permite apenas uma comparação entre diversos materiais do ponto de vista da absorção final do ensaio (Nepomuceno, 2005). Logo, para uma análise mais profunda, o ensaio foi acompanhado por 1.416 horas (68 dias) de contato água-concreto e também avaliou-se a absorvibilidade dos concretos ao final deste período.

A Análise de Variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade, indicou que as médias de absorção por capilaridade, após 72 horas, dos concretos não apresentaram diferenças significativas. No entanto, após 1.416 horas, ao nível de 5% de probabilidade, houveram diferenças significativas entre os concretos CREF e CRBC, assim como entre o concreto CRBC e CRCR. O acúmulo de água foi maior para o concreto CRBC, o que pode comprometer a durabilidade deste concreto. As médias dos concretos CREF e CRCR, e CREF e CRCR/RBC, assim como CRCR e CRCR/RBC, e CRBC e CRCR/RBC não foram consideradas estatisticamente diferentes.

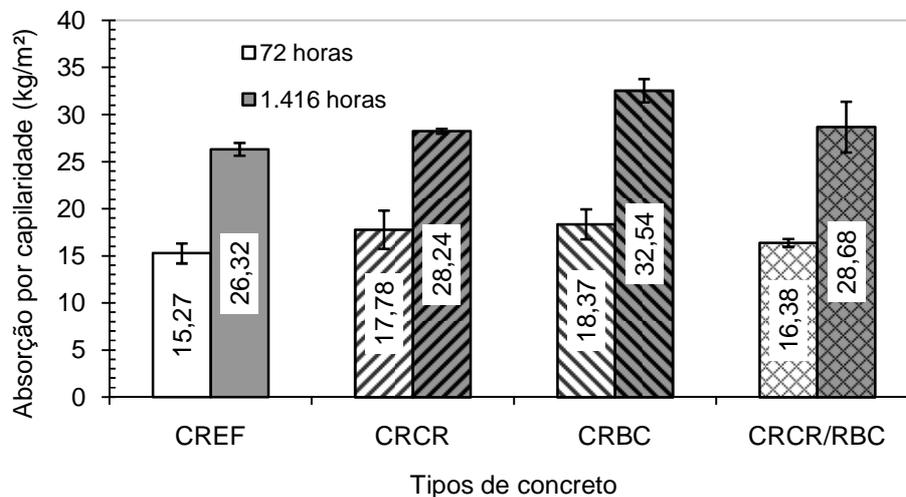


Figura 37 – Absorção por capilaridade dos concretos com correção do abatimento com água após 72 horas e após 1.416 horas.

Apesar dos valores de absorção total e do índice de vazios terem sido maiores para o CRCR/RBC do que para os outros concretos estudados, a absorção capilar

deste concreto não foi estatisticamente diferente em relação ao concreto de referência, ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Hall (1989), Martys e Ferraris (1997) e Gonçalves (2005) a absorção por capilaridade pode ser dividida em dois estágios (Figura 38). O estágio 1 (S1) é caracterizado pelo período de absorção com um comportamento de ganho de massa em função do tempo. Nesse estágio, o fluxo de água acontece nos poros aprisionados (gerados durante a moldagem) e capilares maiores. O estágio 2 (S2), caracterizado pela mudança da inclinação da reta, chamado de período de saturação, a taxa de absorção é reduzida, porque provavelmente, o fluxo de água ocorre em poros capilares menores. O ponto de passagem do estágio de absorção para o estágio de saturação pode ser chamado de "*ponto de transição (Pt)*". Portanto, uma mesma mistura analisada poderá ter duas taxas de absorção (absortividades, determinadas pelas declividades das retas) distintas, a da fase de absorção e a da fase de saturação, sendo a segunda bem menor do que a primeira.

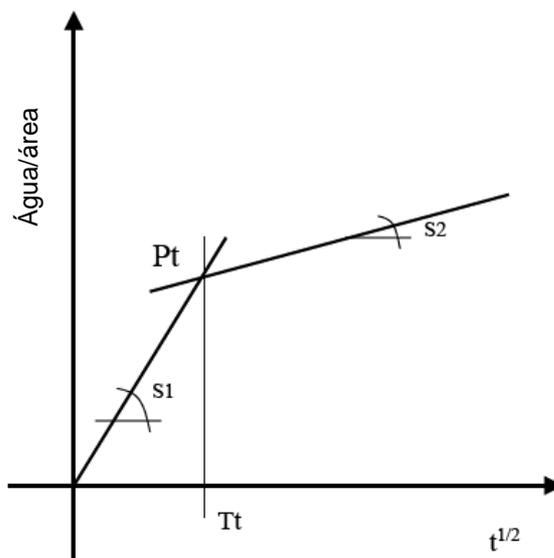


Figura 38 – Gráfico típico do acréscimo de massa aparente em função da raiz quadrada do tempo (Gonçalves, 2005).

A Figura 39 apresenta um gráfico com a evolução da massa de água absorvida em função da raiz quadrada do tempo. Nota-se facilmente os dois estágios da absorção. Observa-se que no intervalo de tempo de 72 horas todas as misturas ainda

não iniciaram o processo de saturação (estágio 2), permanecendo no estágio 1. O ponto de transição para o concreto CREF foi de aproximadamente 199 h, e 169, 144 e 149 h para os concretos CRCR, CRBC e CRCR/CRBC respectivamente. Ou seja, a adição de resíduos reduziu o ponto de passagem do estágio de absorção para o estágio de saturação.

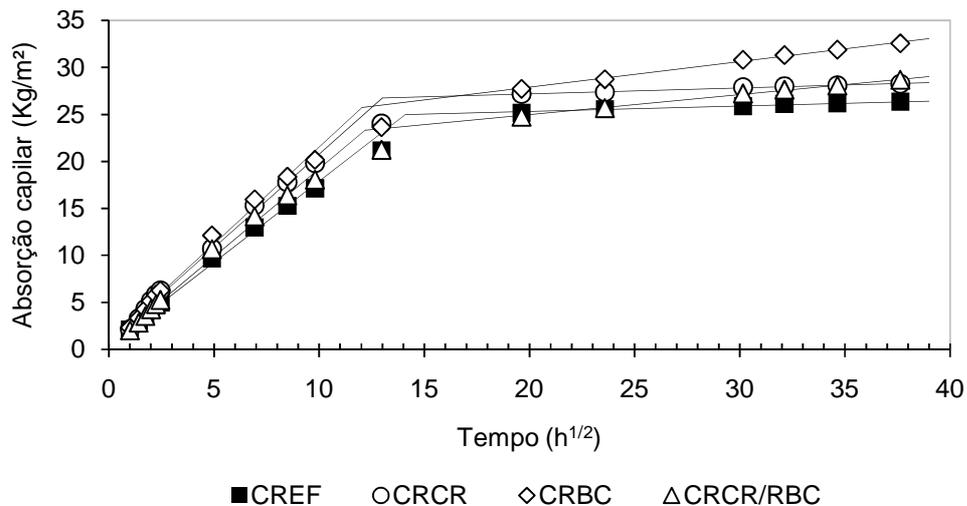
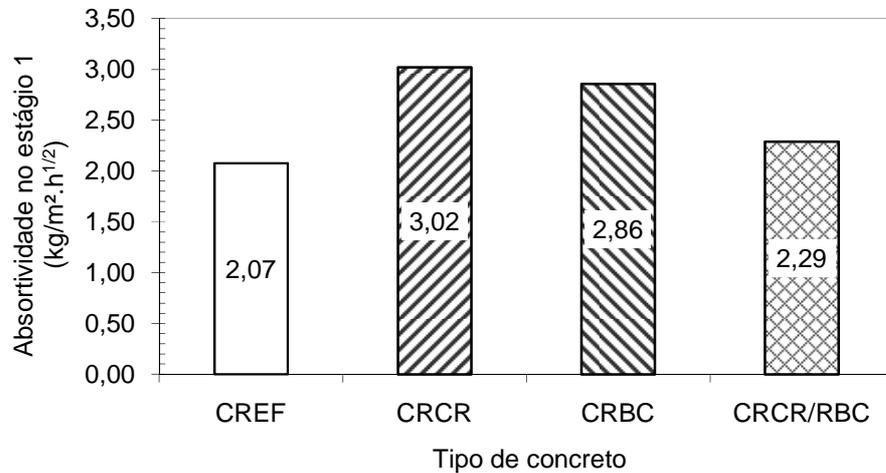


Figura 39 – Curvas típicas de ganho acumulado de massa de água em função da raiz quadrada do tempo dos concretos dos concretos com correção do abatimento com água.

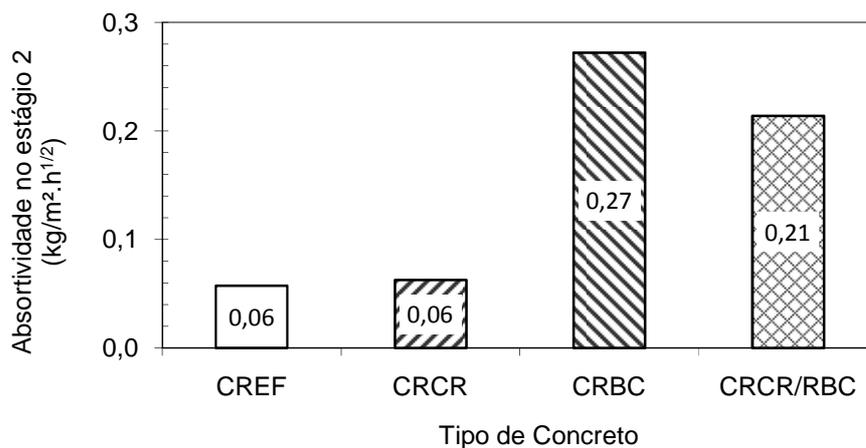
A absorvidade foi obtida através da inclinação das retas (S1 e S2) que correlaciona o ganho de massa de água e a raiz quadrada do tempo. A absorvidade foi expressa em  $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  e o ganho de massa foi avaliado nos cinco pontos iniciais de cada curva para o estágio 1 e nos 4 pontos finais de cada curva para o estágio 2. Nestes intervalos o comportamento pode ser descrito como linear.

A Figura 40 apresenta os valores da absorvidade nos estágios 1 e 2 das misturas avaliadas. Todas as misturas com resíduos tiveram aumento da absorvidade, em ambos os estágios, em relação à mistura de referência. No estágio 1 foram observados aumentos da absorvidade de 46, 38 e 10% para o CRCR, CRBC e CRCR/RBC, respectivamente, em relação ao concreto CREF. O aumento da

absortividade no estágio 2 foi de 10, 376 e 274% para as misturas CRCR, CRBC e CRCR/RBC, respectivamente, em relação ao concreto CREF.



Estágio 1



Estágio 2

Figura 40 – Absortividade dos concretos com correção do abatimento com água (a) estágio 1 e (b) estágio 2.

Estudo feito por Gonçalves (2000) mostrou que a adição de 10% de resíduo de corte de granito em concretos reduziu a taxa de absorção por capilaridade. Neste mesmo estudo para o mesmo teor de adição e diferentes relações água/cimento, Gonçalves afirma que, de forma geral, quanto maior for a relação água/cimento, maior o incremento na taxa de absorção. Então pôde-se dizer que o incremento na

absortividade no estágio 01 para o concreto CRCR em relação ao concreto de referência ocorreu provavelmente devido a maior relação água/cimento do concreto.

Estudo feito por Vieira (2005) em concretos com 20% de substituição, em massa, do cimento Portland por resíduo cerâmico, com relação água/material cimentício de 0,50, mostrou um aumento da absortividade no estágio 1 de 27% e de 15 % no estágio 2 em relação ao concreto de referência. Considerando os resultados obtidos para os concretos com substituição do cimento por RBC e o estudo feito por Vieira (2005), pode-se dizer que a redução na concentração de sólidos, nas misturas com maior relação água/material cimentício e a redução do volume de cimento e, conseqüentemente, redução da quantidade de produtos hidratados e incremento na porosidade total, conduziram à formação de uma maior quantidade de vazios capilares, sendo responsável pela elevação da absortividade nos estágios 1 e 2 nos concretos com substituição do cimento por RBC.

Para o concreto CRCR/RBC, a adição do RCR provocou uma pequena redução na absortividade em ambos os estágios em relação ao concreto CRBC, fato este provavelmente devido ao seccionamento dos poros produzidos pelas partículas de RCR e pela menor relação água/material seco deste concreto em relação ao concreto CRBC.

#### **4.2.1.3. Permeabilidade a gás**

A Figura 41 indica os valores de permeabilidade a gás. O gás utilizado foi o nitrogênio. Os resultados obtidos indicam que os concretos que contêm RBC apresentaram redução na permeabilidade a gás em relação à mistura de referência e ao concreto CRCR.

Para Mehta e Monteiro (2008), os poros capilares grandes, 0,03  $\mu\text{m}$  a 0,05  $\mu\text{m}$ , são os que mais influenciam a permeabilidade dos concretos. Pode-se dizer que houve alguma modificação na microestrutura dos concretos com adição de RBC que fez com que fosse reduzida a absorção por capilaridade. Porém, a diferença de grandeza para os resultados obtidos neste ensaio é pequena, podendo considerar todos os concretos de alta permeabilidade, pois segundo Neville (1997) a permeabilidade do concreto varia entre  $10^{-10}$  a  $10^{-16}$  m/s.

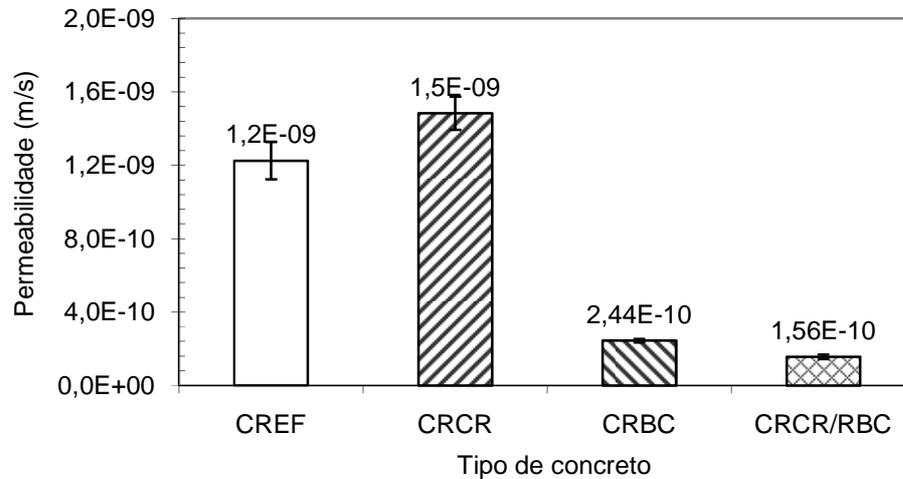


Figura 41 – Permeabilidade a gás de nitrogênio para os concretos com correção do abatimento com água.

#### 4.2.1.4. Penetração acelerada de íons cloreto

A relação água/cimento é um dos fatores que exerce grande influência na penetração de cloretos por determinar características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada (Lopes, 1999). Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e, a princípio, maior será a penetração de cloretos (Pereira, 2001).

A Figura 42 apresenta os resultados do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto. Para o concreto CRBC houve um aumento de 12% na penetração acelerada de íons cloreto em relação ao concreto de referência. Este mesmo comportamento foi verificado por Irassar *et al.* (2000), Winck *et al.* (2000), que encontraram maior penetração de cloretos para os concretos produzidos com fíler em relação aos concretos confeccionados sem adição.

Nos concretos CRBC e CRCR/RBC houve redução no valor de penetração acelerada de íons cloreto em 12 e 15%, respectivamente contudo não houve mudança na classificação. Gonçalves (2005) também observou uma queda nos valores de penetração acelerada de íons cloreto quando substituiu parte do cimento por resíduo cerâmico em concretos. A adição de pozolanas em concretos modifica a porosidade e a

microestrutura da pasta, incorporando cátions que influenciam na maior ou menor penetração de cloretos (Saciloto, 2005). Certamente, a presença do alumínio, em sua forma amorfa, no resíduo cerâmico favorece a combinação destes íons com o cloreto, através da formação de uma série de sais contendo alumina, tais como o sal de Friedel (Glasser, 1999), reduzindo os valores de penetração acelerada de íons cloreto.

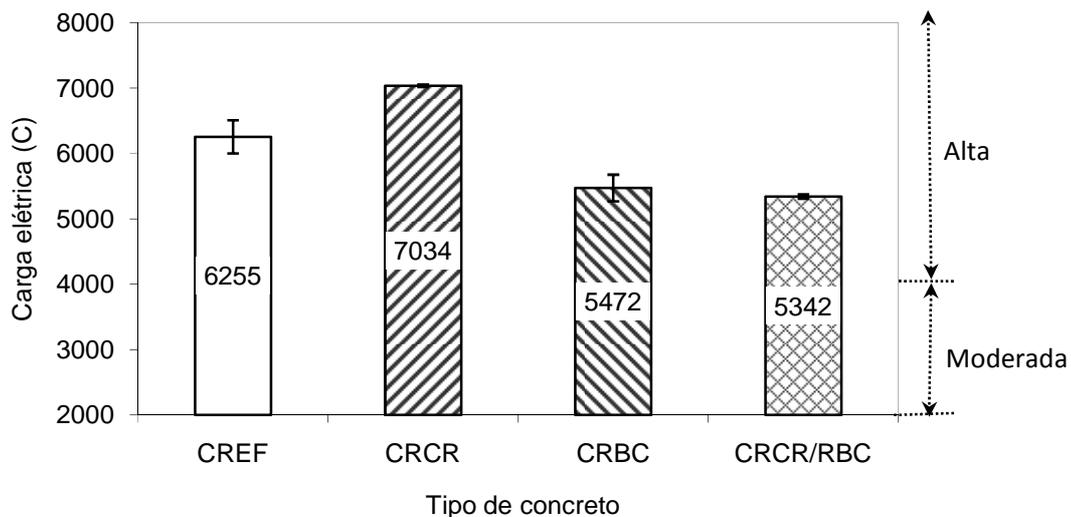


Figura 42 – Penetração acelerada de íons cloreto para os concretos com correção do abatimento com água.

Segundo Sato e Agopyan (1999), a penetração de íons cloreto ocorre em proporção direta com o volume de poros maiores. Naturalmente, quanto maior a quantidade de poros maiores, o transporte de água ou de íons ocorre com maior facilidade e com maior velocidade, influenciando também nestes fenômenos a conectividade entre os poros. A permeabilidade tem papel importantíssimo no transporte dos íons, pois quanto maior a permeabilidade do concreto, maior a penetração acelerada de íons cloreto.

Logo, os fatores que influenciaram a penetração acelerada de íons cloreto nos concretos estudados foram a alumínio presente no RBC e a permeabilidade. Se comparados os ensaios de permeabilidade a gás com o de penetração acelerada de íons cloreto observa-se que os resultados seguem uma mesma tendência, devido ao fato de que a penetração de cloretos está diretamente relacionada com a

permeabilidade do concreto, já que os íons cloreto atravessam toda a matriz de concreto durante o ensaio.

Apesar da redução na penetração acelerada de íons cloreto nos concretos contendo RBC, de acordo com os critérios estabelecidos na ASTM C 1202 (1997), todos os concretos podem ser classificados como de “alta” penetração iônica, com carga elétrica passante acima de 5.000 C.

#### **4.2.1.5. Ataque por sulfato de magnésio**

A avaliação do comportamento dos concretos contendo resíduos quando submetidos ao ataque por sulfato de magnésio seguiu o método estabelecido no item 3.2.4.3. Adotou-se como parâmetro de avaliação a resistência à tração na flexão dos concretos nas idades de referência (28 dias) e após 60 e 120 dias de exposição ao ataque por sulfato, em ciclos de imersão na solução (10 dias) e secagem ao ar livre (10 dias).

A deterioração das argamassas foi avaliada determinando-se o dano de resistência à tração (DRT), como definido por Lee *et al.* (2004) *apud* Gonçalves (2005) e calculado conforme a Equação 14. Na Tabela 15 são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos, na idade de referência (28 dias) e com 60 e 120 dias de exposição na solução de controle (água) e solução contendo sulfato, bem como os valores do dano de resistência à tração (DRT). Observa-se que para ambos os tempos de exposição avaliados o DRT é negativo.

Quando o DRT é negativo significa que houve um aumento na resistência à tração nos concretos expostos à solução de sulfato. Isto ocorre devido ao preenchimento de poros por produtos expansivos como a etringita secundária, que inicialmente densifica a matriz. Este ganho de resistência à tração na flexão foi maior para os concretos com maiores relações água/material cimentício. Logo, pode-se dizer que estes concretos serão mais suscetíveis à deterioração. Apesar da tentativa de acelerar o ataque com ciclos de imersão e secagem, o tempo de exposição à solução de sulfato de 120 dias não foi suficiente para causar efeitos deletérios na resistência mecânica dos concretos.

Tabela 15 - Resistência à tração na flexão dos concretos na solução de referência (ftr), submetido ao ataque por sulfato (fts) e o dano de resistência à tração (DRT).

Tempo de imersão (dias)	Concreto	ft (MPa) - Coeficiente de variação (%)				DRT (%)
		Solução				
		Ftr - Água	fts - 10% MgSO <sub>4</sub>			
28 dias - 0 dias de exposição ao ataque	CREF	4,47	3,75	-	-	-
	CRCR	4,42	4,71	-	-	-
	CRBC	3,39	3,46	-	-	-
	CRCR/RBC	3,46	6,33	-	-	-
88 dias - 60 dias de exposição ao ataque	CREF	4,56	2,09	4,76	3,46	-4,32%
	CRCR	4,44	3,09	5,29	5,78	-19,18%
	CRBC	3,66	10,46	4,96	6,34	-35,37%
	CRCR/RBC	3,73	6,27	4,76	9,97	-27,44%
148 dias - 120 dias de exposição ao ataque	CREF	4,88	2,23	5,13	6,32	-5,01%
	CRCR	4,68	13,00	4,86	4,56	-3,83%
	CRBC	3,87	12,21	4,84	20,75	-25,25%
	CRCR/RBC	4,02	4,12	4,65	1,23	-15,63%

A Figura 43 mostra o difratograma de raios X da pasta de referência, aos 28 dias, com relação água/cimento igual a 0,60, que apresenta picos de portlandita e calcita. A calcita (carbonato de cálcio) está presente devido à exposição da amostra ao CO<sub>2</sub> da atmosfera. A Figura 44 apresenta o difratograma da pasta de referência com idade de 148 dias.

A Figura 45 mostra o difratograma de raios X da pasta de referência com idade de 148 dias e 120 dias de exposição ao sulfato de magnésio, em ciclos de imersão (10 dias) e secagem (10 dias). Neste difratograma, além dos picos de portlandita e calcita, há picos de etringita secundária e gipsita.

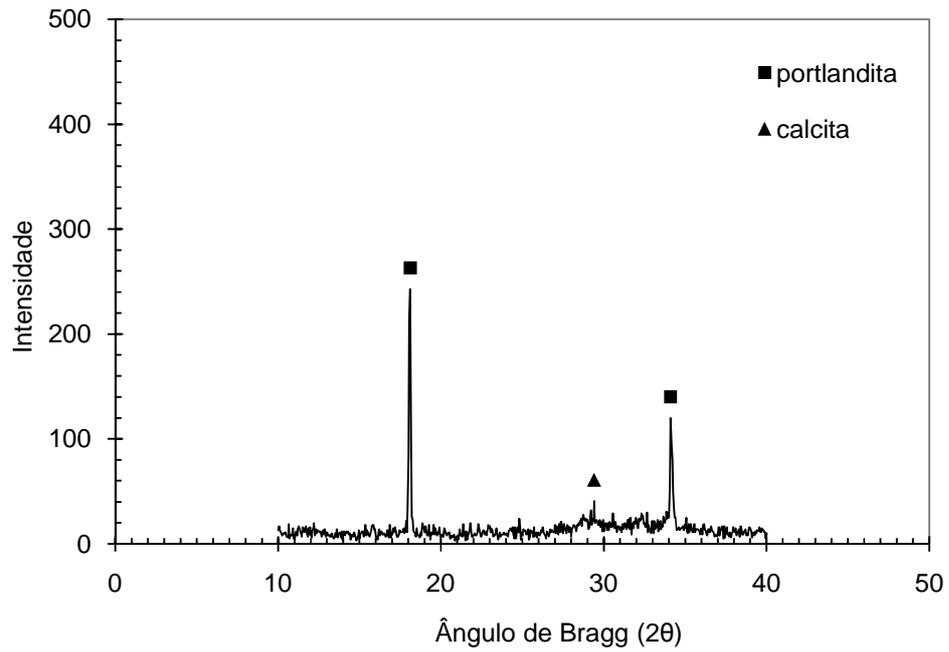


Figura 43 – Difratoograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 28 dias.

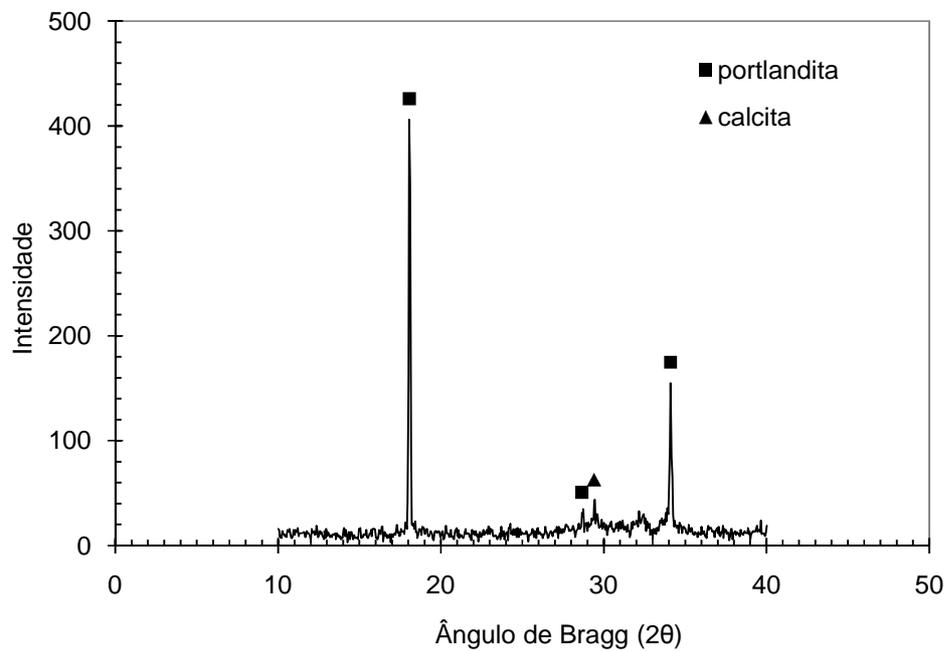


Figura 44 – Difratoograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 148 dias.

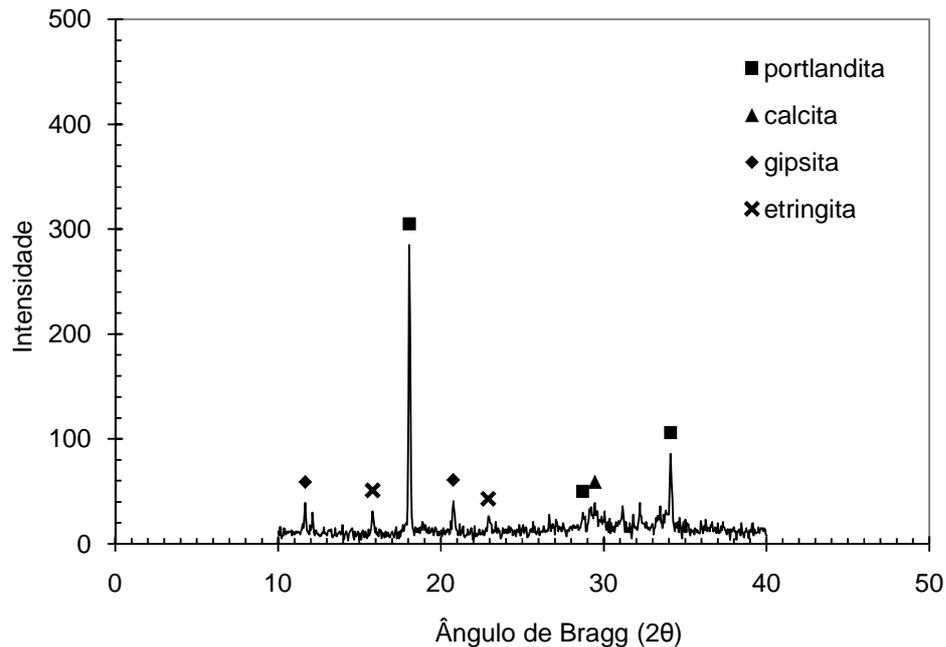


Figura 45 – Difratograma de raios X da pasta de cimento Portland com idade de 148 dias e 120 dias de exposição ao sulfato de magnésio.

A Figura 46 mostra o difratograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento por RBC e adição de 10% de RCR, com relação água/material cimentício de 0,72 e idade de 28 dias. Neste difratograma observaram-se picos de portlandita, calcita e quartzo.

A Figura 47 apresenta o difratograma da pasta com RCR e RBC com idade de 148 dias.

A Figura 48 mostra o difratograma da pasta com RCR e RBC com idade de 148 dias e exposição ao sulfato de magnésio por 120 dias, em ciclos de imersão (10 dias) e secagem (10 dias). Neste difratograma, além dos picos de portlandita, calcita e quartzo, também foi encontrado picos de gipsita e etringita secundária devido ao ataque por sulfato de magnésio.

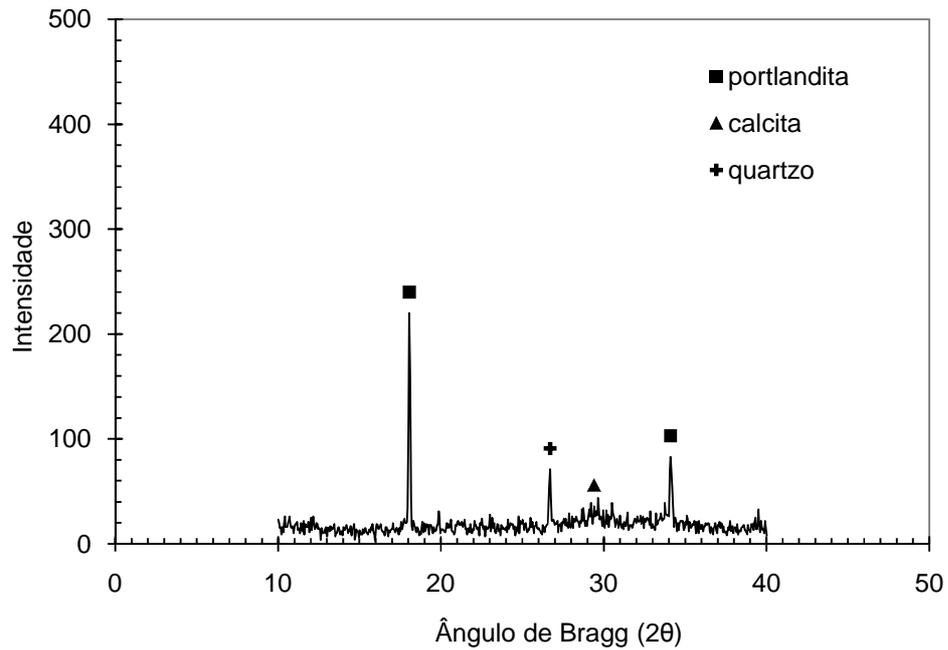


Figura 46 – Difratoograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício, com idade de 28 dias.

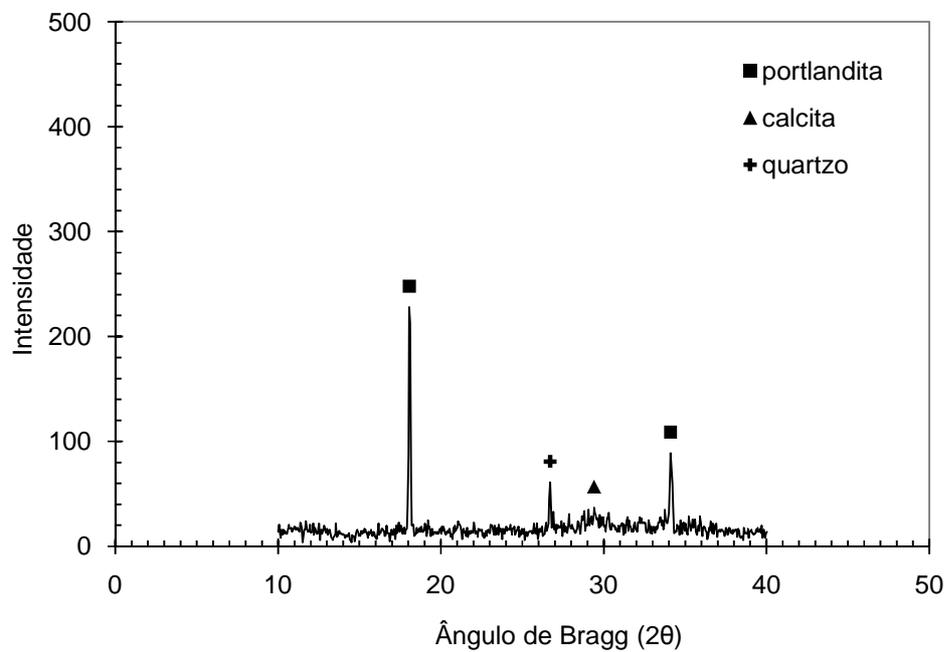


Figura 47 – Difratoograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício, com idade de 148 dias.

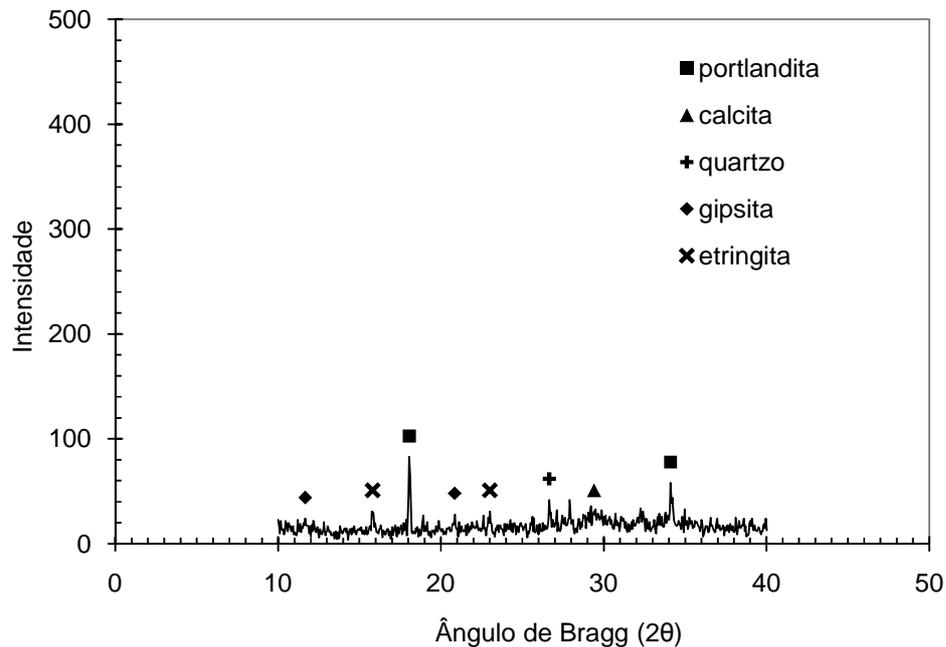


Figura 48 – Difratograma de raios X da pasta com 20% de substituição do cimento Portland por RBC e adição de 10% de RCR sobre a massa de material cimentício com idade de 148 dias e 120 dias de exposição ao sulfato de magnésio.

## 4.2.2. Ensaios mecânicos

### 4.2.2.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A Figura 49 mostra os valores médios das resistências à compressão de três corpos-de-prova e seus respectivos desvios-padrões aos 42 e 170 dias. Aos 42 dias, o concreto de referência apresentou resistência à compressão de 27,94 MPa, e os concretos com resíduos resistências de 24,02, 19,19, e 20,96 MPa para os concretos CRCR, CRBC e CRCR/RBC, respectivamente. A análise estatística (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade, mostrou que os valores médios de resistência foram significativamente menores para os concretos com resíduos em relação ao concreto CREF. O valor de resistência foi intermediário para o CRCR e os menores valores de

resistência para o CRBC e CRCR/RBC, que não apresentaram diferenças significativas entre si.

Aos 170 dias o concreto CREF apresentou resistência de 28,5 MPa, e os concretos com resíduos resistências de 26,54, 20,75 e 24,06 MPa para os concretos CRCR, CRBC e CRCR/RBC, respectivamente. Os maiores valores de resistência são apresentados pelos concretos CREF e CRCR que estatisticamente, através da ANOVA, não apresentaram diferenças significativas entre si. Os concretos CRCR e CRCR/RBC possuem resistência intermediária e também não apresentam diferenças significativas entre si. Já o concreto CRBC foi o que apresentou menor resistência à compressão entre as misturas avaliadas.

Comparando a evolução da resistência com o tempo, não houve diferença significativa entre os valores de resistência aos 42 dias e 170 dias, para os concretos CREF e CRCR. Já para os concretos CRBC e CRCR/RBC, as médias de resistência a compressão aos 42 e 170 dias foram significativamente diferentes entre si, sendo maiores para 170 dias. Este fato ocorreu possivelmente devido à atividade pozolânica do RBC, que se desenvolve em idades mais avançadas.

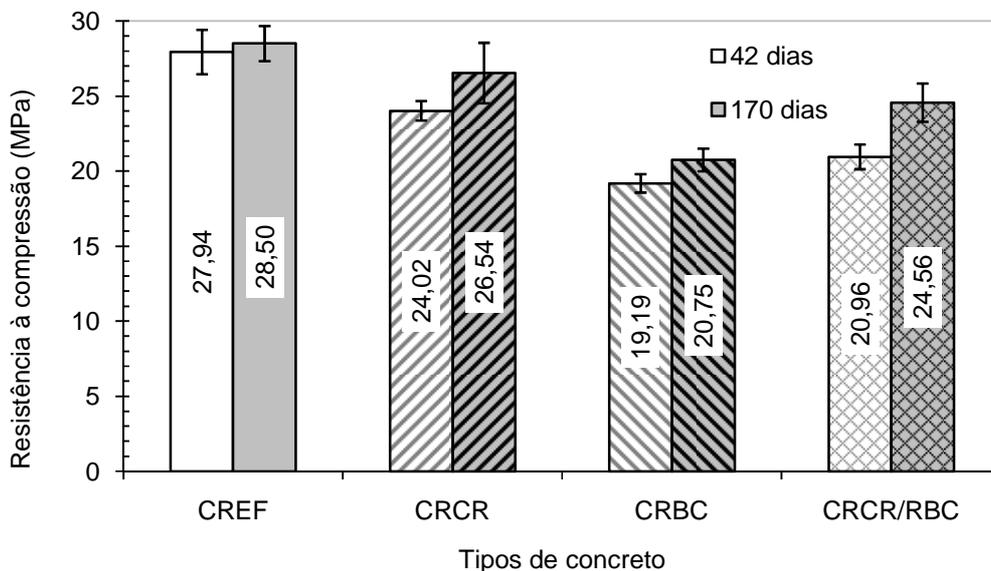


Figura 49 – Resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone, em função da idade.

A Figura 50 apresenta as curvas tensão *versus* deformação dos concretos, obtidas após 42 dias de cura. Nas curvas notou-se o comportamento mecânico inferior dos concretos com resíduos em relação ao concreto de referência. Após 170 dias de cura os concretos com resíduos também apresentaram um comportamento mecânico inferior em relação ao concreto de referência (Figura 51). Em ambas as idades, os concretos com resíduos tiveram maior deformabilidade, ou seja, para o mesmo nível de tensão os concretos com resíduos apresentaram um maior nível de deformação. O comportamento mecânico do concreto CRCR foi o que mais se aproximou do comportamento do concreto de referência, seguido pelo concreto CRCR/RBC. Já o concreto CRBC, dentre todos os concretos e em ambas as idades, foi o que apresentou a maior deformabilidade.

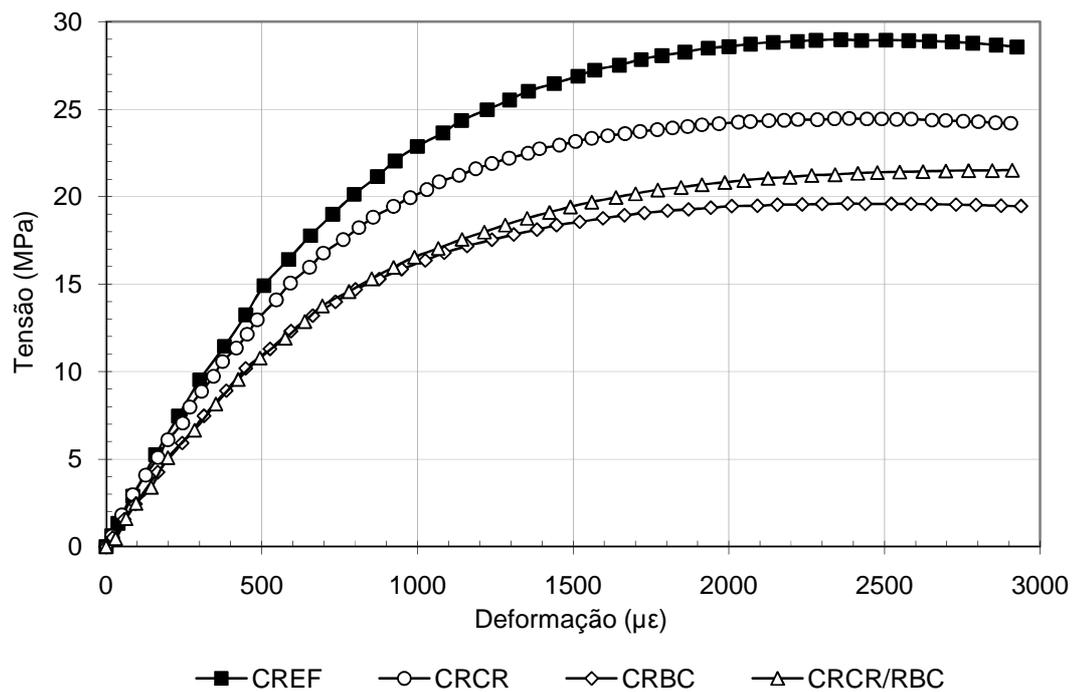


Figura 50 – Curvas tensão versus deformação dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, aos 42 dias.

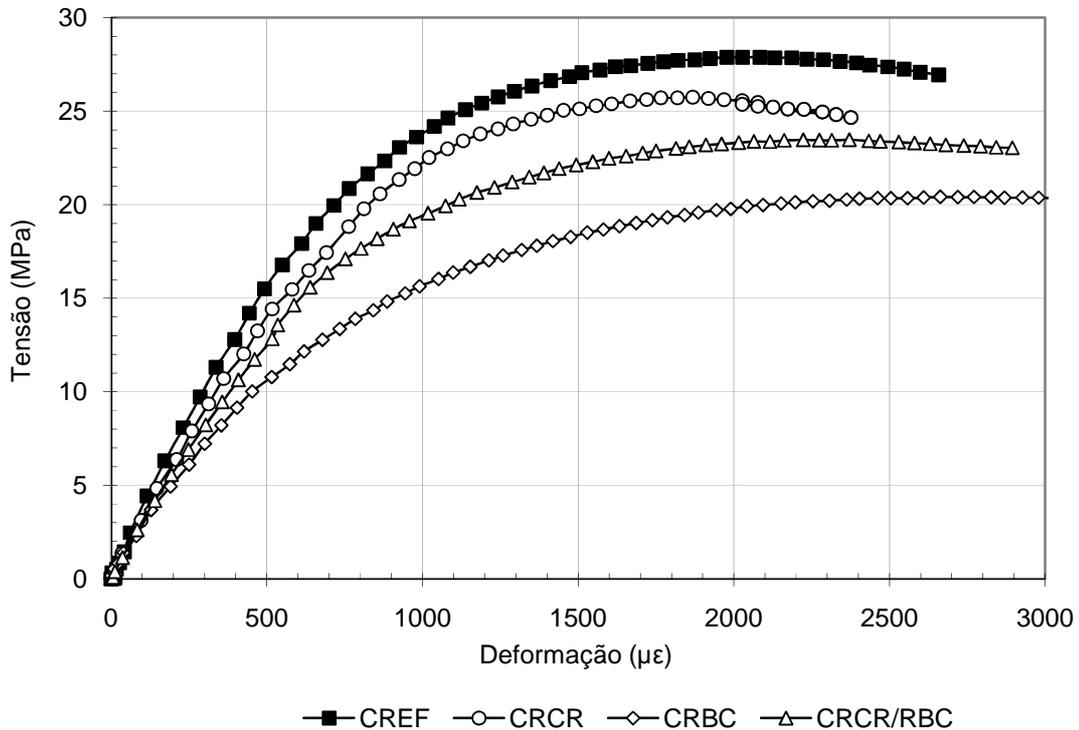


Figura 51 – Curvas tensão *versus* deformação dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, aos 170 dias.

A Figura 52 mostra o módulo de elasticidade dos concretos aos 42 e 170 dias. Aos 42 dias concreto CREF apresentou módulo de elasticidade de 28,90 GPa, os concretos CRCR, CRBC e CRCR/CRBC apresentaram módulos de elasticidade de 27,02, 23,90 e 23,38 GPa, respectivamente. Assim como na resistência à compressão aos 42 dias, mostrou que as médias entre o concreto CREF e os concretos com resíduos são significativamente diferentes entre si, ao nível de 5% de probabilidade. Apenas os concretos CRBC e CRCR/RBC não apresentaram diferenças significativas entre si. Aos 170 dias, o concreto CREF apresentou módulo de 29,43 MPa, e os concretos CRCR, CRBC e CRCR/CRBC apresentaram módulos de elasticidade de 29,76, 22,77 e 25,99 GPa, respectivamente. Também, assim como na resistência à compressão aos 170 dias, entre as médias de módulo de elasticidade dos concretos CREF e CRCR, e CRCR e CRCR/BRC não apresentaram diferenças significativas entre si, ao nível de 5% de probabilidade.

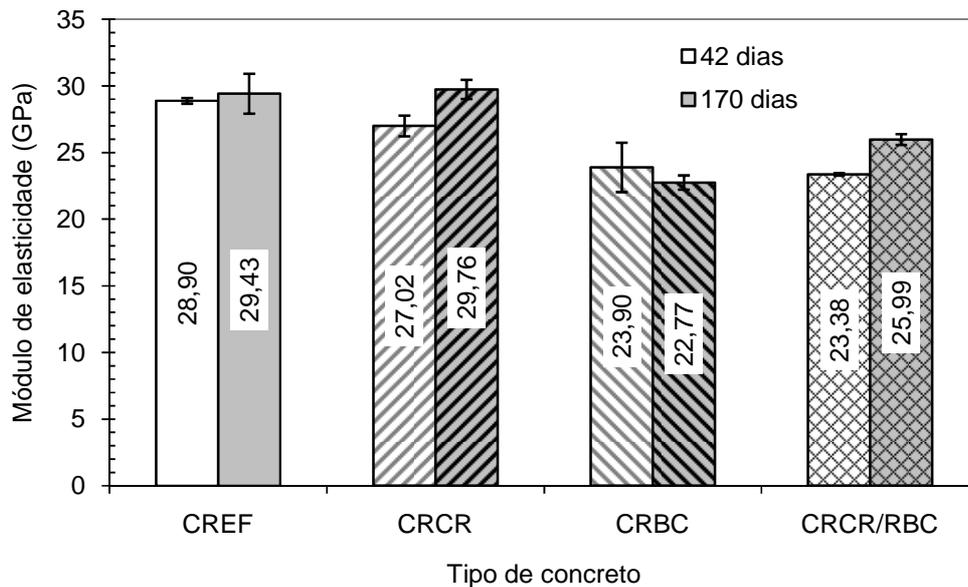


Figura 52 – Módulo de elasticidade dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, em função da idade.

O comportamento mecânico dos concretos está em consonância com o índice de vazios, pois o concreto CREF foi o que apresentou maior resistência a compressão e menor índice de vazios. Com o aumento da relação água/material cimentício de 0,60 para 0,63 no concreto CRCR, aumentou o índice de vazios e reduziu a resistência à compressão e o módulo de elasticidade aos 42 dias. Porém, esta redução de resistência à compressão e módulo de elasticidade não foi significativamente diferente aos 170 dias. Logo, pode-se dizer que o aumento da relação água/material cimentício e a adição de 10% de RCR não influenciaram significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade quando avaliado para longas idades.

Os menores valores de resistência a compressão, em relação ao concreto CREF foram apresentados pelos concretos com relação água/material cimentício de 0,72 e substituição de 20% do cimento por RBC, ou seja, CRBC e CRCR/RBC. Esta redução na resistência à compressão e no módulo de elasticidade se deve a maior relação água/material cimentício que aumentou o índice de vazios e também provavelmente devido a pouca atividade pozolânica do RBC. Comparando apenas o CRBC e o CRCR/RBC, aos 42 dias a resistência à compressão e módulo de elasticidade não são consideradas significativamente diferentes, ao nível de 5% de probabilidade. Já aos 170

dias o concreto CRCR/RBC apresenta resistência à compressão e módulo de elasticidade significativamente maior ao concreto CRBC.

Pôde-se verificar que a incorporação de resíduos e o aumento da relação água/material cimentício resultaram em um comportamento mecânico inferior ao concreto de referência. Este fato se deu pela redução da massa específica e conseqüente aumento do índice de vazios e dos poros capilares, reduzindo a resistência à compressão, aumentando a deformação e, conseqüentemente reduzindo o módulo de elasticidade. A relação direta entre resistência mecânica e módulo de elasticidade advém do fato de que ambos são afetados pela porosidade das fases constituintes, porém não no mesmo grau (Mehta e Monteiro, 2008).

Do ponto de vista da resistência mecânica, a relação água/cimento foi provavelmente o fator mais importante para a redução na resistência dos concretos com resíduos em relação ao concreto CREF, pois este fator afeta a porosidade da matriz de argamassa de cimento e da zona de interface e transição entre a matriz e o agregado graúdo. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a relação água/cimento–resistência do concreto pode ser facilmente explicada em conseqüência natural do enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade. Além disso, segundo Gonçalves (2005), a substituição de cimento por resíduo cerâmico promove concretos com maior capacidade de deformação. Porém, estudos feitos em pastas e concretos com adição de pó-de-pedra (Rahhal e Talero, 2005; Gonçalves, 2000), mantendo-se a mesma relação água/material cimentício de 0,5 e 0,4, 0,55 e 0,7, respectivamente, obtiveram o comportamento mecânico similar ou superior ao concreto de referência, principalmente em relação à resistência à compressão. Este fato demonstra que a queda nas propriedades mecânicas para o CRCR se deu devido à maior relação água/material cimentício.

Já no caso dos concretos com substituição do cimento por resíduo cerâmico, nos estudos feitos por Vieira (2005) e Gonçalves (2005) em concretos com substituição de 20% do cimento pelo resíduo, mantendo a mesma relação água/material cimentício de 0,5 e 0,38, 0,50 e 0,62, respectivamente, resultaram em comportamento mecânico um pouco inferior ao do concreto de referência, porém não na intensidade encontrada neste trabalho. Logo, o comportamento mecânico inferior pode ser atribuído,

principalmente, pela maior relação água/material cimentício, e também pela pouca atividade pozolânica do RBC.

#### 4.2.2.2. Resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão a quatro pontos

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Figura 53. Observou-se que os resultados de resistência à tração por compressão diametral seguem a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão. Segundo Mehta e Monteiro (2008), as resistências à compressão e à tração são intimamente ligadas; entretanto, não há proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta a resistência à tração também aumenta, mas em uma taxa menor.

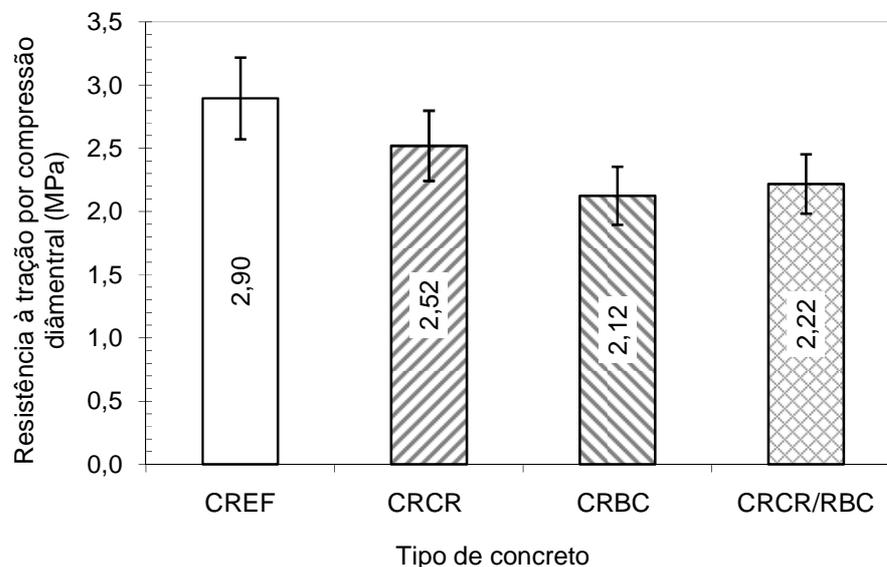


Figura 53 – Resistência à tração por compressão diametral aos 42 dias dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.

De acordo com a análise estatística, ao nível de 5% de probabilidade, não houve diferença significativa nos valores médios de resistência à tração por compressão diametral entre os concretos CREF e CRCR, estes possuindo os maiores valores de

resistência (2,90 e 2,52 MPa, respectivamente). O CRBC apresentou o menor valor de resistência (2,12 MPa) e o concreto CRCR/RBC apresentou resistência intermediária (2,22 MPa). Logo pode-se dizer que assim como na resistência à compressão o aumento da relação água/material cimentício nos concretos com resíduos reduziu a resistência à tração por compressão diametral, não sendo a redução da resistência proporcional ao aumento da relação água/material cimentício, pois as médias de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com resíduos não foram significativamente diferentes.

Os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 60 dias são apresentados na Figura 54. Notou-se, como já era esperado, que os resultados de resistência à tração na flexão seguiram a mesma tendência de resistência à tração por compressão diametral e os resultados de resistência à compressão.

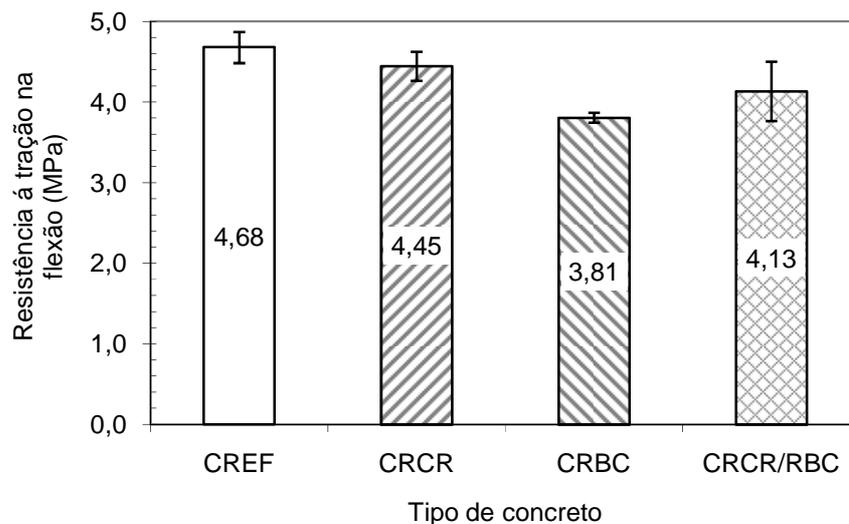


Figura 54 – Resistência à tração na flexão aos 60 dias dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água.

Os valores de resistência à tração na flexão foram de 4,68 MPa, para o concreto CREF, e 4,45, 3,81, e 4,13 MPa para os concretos CRCR, CRBC e CRCR/RBC. Não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, nos valores médios de resistência à tração na flexão, apenas entre os concretos CREF e CRCR, e CRCR e CRCR/RBC. O aumento da relação água/material cimentício de 0,60 para 0,72 nos

concretos CRBC e CRCR/RBC, em relação ao concreto de referência, influenciou significativamente a resistência à tração na flexão.

Como esperado, os valores de resistência à tração na flexão foram maiores que os valores de tração por compressão diametral. O ensaio de tração por compressão diametral superestima a resistência à tração do concreto em 10 a 15%. Já no ensaio de resistência à tração na flexão, a resistência pode ser até duas vezes maiores do que a resistência à tração direta (Mehta e Monteiro, 2008).

### **4.3. Concretos com correção do abatimento com superplastificante**

Como já foi dito anteriormente, adotou-se duas alternativas para se conseguir trabalhabilidade nos concretos com a incorporação de resíduos: a correção com água e a correção com superplastificante. Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos dos concretos com correção do abatimento com superplastificante.

#### **4.3.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade**

A Figura 55 mostra as médias das resistências à compressão de três corpos-de-prova e seus respectivos desvios-padrões aos 42 e 170 dias. Aos 42 dias, em relação ao concreto CREF (27,94 MPa), o concreto CRBC (25,81 MPa) apresentou queda na resistência à compressão de 17%; já o concreto CRCR/RBC (36,16 MPa) obteve um aumento na resistência de 20%, ambos apresentaram diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, em relação ao concreto CREF. A análise estatística também indicou que não houve diferença significativa de resistência à compressão entre os concretos CREF e CRCR (25,81 MPa).

Aos 170 dias, os concretos CREF, CRCR e CRBC, não apresentaram diferenças significativas para os valores de resistências à compressão, com valores de resistência de 28,50, 27,63 e 26,52 MPa, respectivamente. Já o concreto CRCR/RBC (36,16 MPa) obteve aumento significativo de resistência à compressão em relação a todos os outros concretos, com aumento de 27% de resistência à compressão, em relação ao concreto CREF.

Analisando o aumento da resistência com o tempo, entre as duas idades ensaiadas (42 e 170 dias), os concretos CREF, CRCR não apresentaram diferenças significativas de resistência ao longo do tempo, segundo a análise estatística, ao nível de 5% de probabilidade. Já os concretos CRBC e CRCR/RBC obtiveram aumento significativo na resistência de 14 e 8%, respectivamente. Este mesmo comportamento foi observado nos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água. Este fato indica que houve alguma atividade pozolânica do RBC.

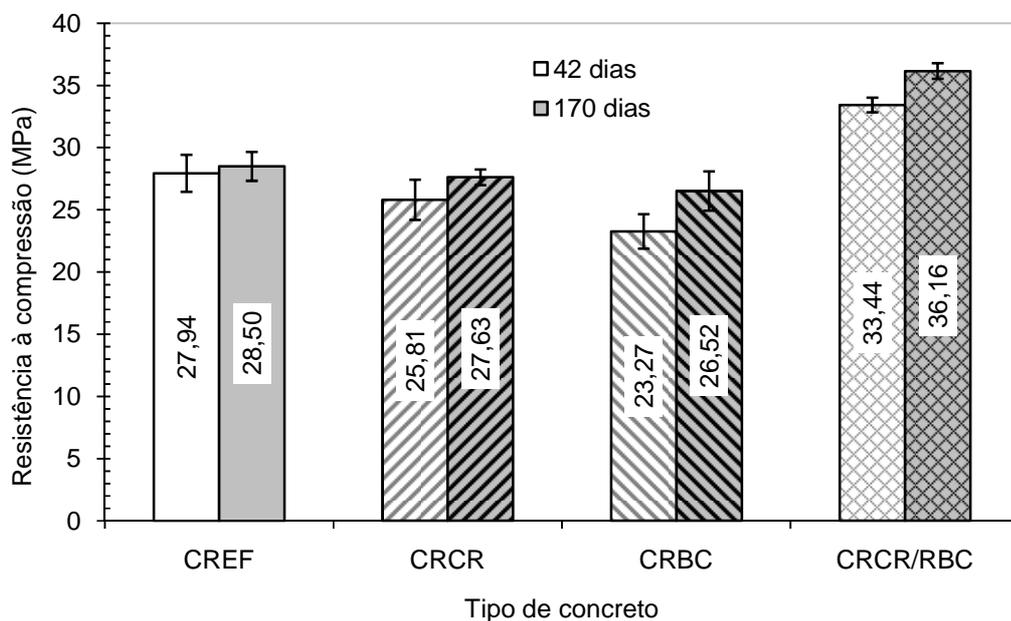


Figura 55 – Resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com superplastificante, aos 42 e 170 dias.

A Figura 56 apresenta as curvas tensão *versus* deformação dos concretos obtida após 42 dias de cura. Notou-se que o CRCR e o CRBC apresentaram comportamento inferior ao concreto de referência, porém superior ao comportamento apresentado pelos concretos onde foi modificada a relação água/material cimentício. Já o CRCR/RBC, assim como na resistência à compressão, apresentou comportamento mecânico superior em relação à curva tensão *versus* deformação do concreto CREF e, também, ao CRCR/RBC com correção do abatimento de tronco de cone com água. Vale ressaltar que estes resultados já eram esperados, pois a maior relação água/material

cimentício aumenta os vazios na matriz, prejudicando o comportamento mecânico, e quanto maior a relação água/material cimentício, maior foi a queda nas propriedades mecânicas.

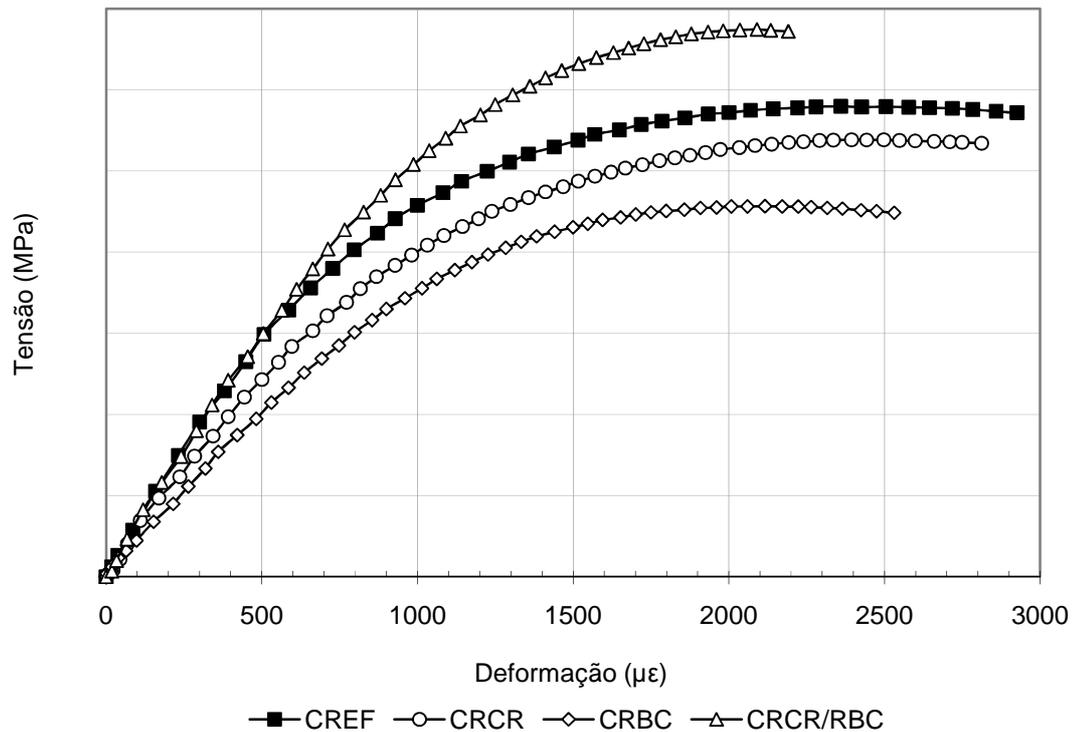


Figura 56 – Curvas tensão *versus* deformação dos concretos com correção do abatimento com superplastificante superplastificante, aos 42 dias.

A Figura 57 apresenta o módulo de elasticidade das misturas aos 42 dias. Os concretos CRCR e CRBC apresentaram redução significativa do módulo de elasticidade, ao nível de 5% de probabilidade, de 18 e 32% em relação à mistura de referência. Já a comparação entre o CREF e CRCR/RBC indicou que as médias de módulo de elasticidade não apresentaram diferenças significativas.

A análise dos concretos com resíduos quanto à resistência à compressão, em relação ao concreto de referência indicou que o concreto CRCR não obteve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade. Este comportamento já foi também verificado por alguns autores, como Gonçalves, (2000) e Rahhal e Talero (2005). Já o módulo de elasticidade do concreto CRCR sofreu redução de 18% em relação ao

concreto de referência, demonstrando que este concreto tem uma deformação maior para o mesmo nível de tensão do concreto CREF.

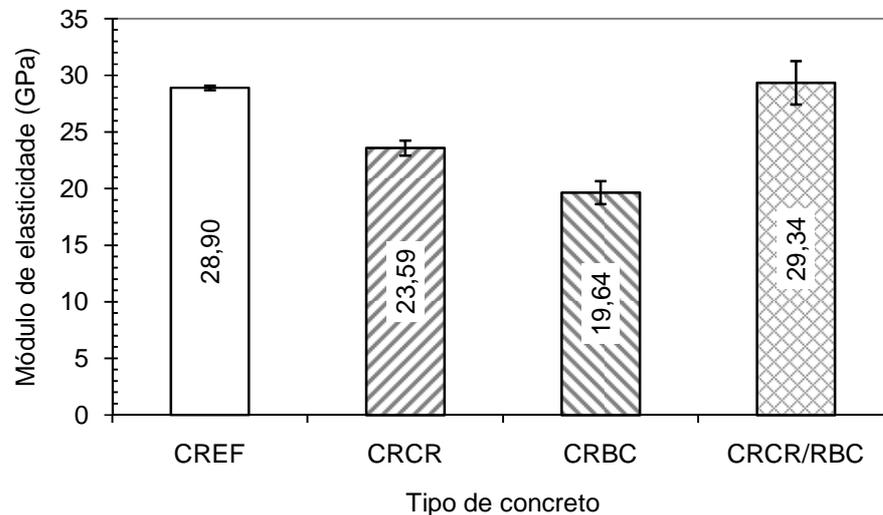


Figura 57 – Módulo de elasticidade dos concretos com correção do abatimento com superplastificante, aos 42 dias.

Para o concreto CRBC, a pequena redução nas propriedades mecânicas, em relação ao concreto de referência, pode ter ocorrido devido a pouca atividade pozolânica do RBC, pois um aumento significativo na resistência só é conseguido com adições de alta pozolanicidade. Além disso, segundo Vieira (2005), uma das razões que podem explicar uma redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade na substituição do cimento por material pozolânico é o aumento da relação água/cimento ocasionado por esta substituição. Porém, os hidratos formados e o RBC não reagido ainda conseguiram manter a matriz suficientemente sólida para não haver diferença significativa na resistência à compressão, em relação ao concreto CREF.

O concreto CRCR/RBC foi o único que obteve resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade superiores ao concreto de referência. Tendência semelhante foi verificada por Carrasco *et. al.* (2005) em estudo da interação entre fíler calcário e escória de alto-forno. Este efeito foi atribuído ao comportamento complementar das adições, o fíler aumentando os pontos de nucleação e melhorando a resistência nas primeiras idades, e a escória de alto-forno melhorando a resistência em idades mais avançadas devido à atividade pozolânica. Porém, apenas uma análise da

microestrutura e ensaios físicos deste concreto poderia esclarecer a melhora das propriedades mecânicas neste concreto.

Como esperado, pôde-se concluir que a queda na resistência nos concretos com correção do abatimento com água foi causado, em maior proporção, pelo aumento da relação água/material cimentício, do que pela adição de resíduos.

#### 4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 58 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral. Os valores de resistência seguem a mesma tendência dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão. O concreto CRCR/CRBC apresentou o maior valor de resistência à compressão por tração diametral, equivalente a 3,67 MPa, sendo 26% maior que o concreto CREF. Já os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos CRCR, CRBC e CREF não diferiram estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade. Estes resultados estão em consonância com os resultados de resistência à compressão, e se comparados com os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água, o que confirmou que a queda de resistência observada nestes concretos ocorreu devido à maior relação água/material cimentício.

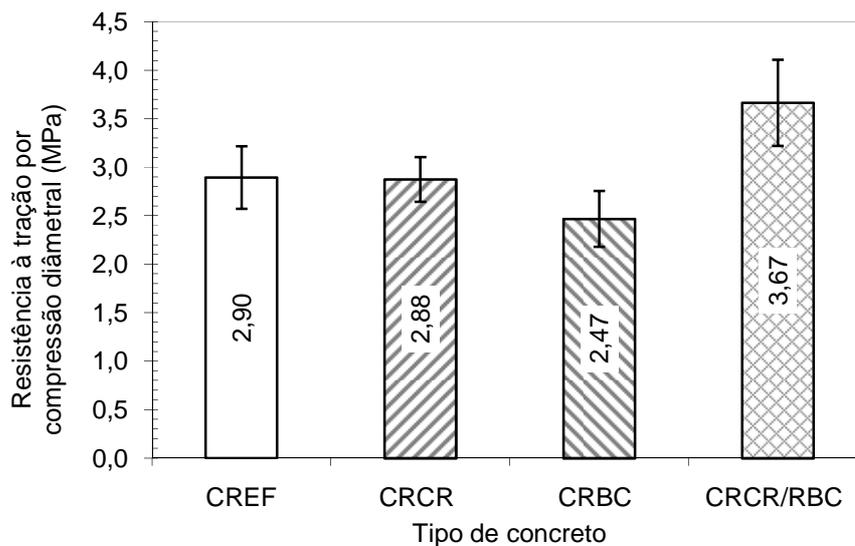


Figura 58 – Resistência à tração por compressão diametral, aos 42 dias dos concretos com correção do abatimento de tronco de cone com superplastificante.

## 5. Considerações finais

### 5.1. Conclusões

Com base nos resultados do programa experimental foi possível obter as seguintes conclusões:

- todos os concretos com resíduos tiveram redução no abatimento do tronco de cone quando comparados com o concreto de referência devido à maior quantidade de finos.

As considerações finais para os concretos com correção do abatimento do tronco de cone com água são:

- para conseguir o mesmo valor de abatimento do tronco de cone do concreto de referência foi necessário aumentar a relação água/material cimentício para 0,63 e 0,70, no concreto com adição de RCR e nos concretos com substituição de parte do cimento por RBC e com substituição de parte do cimento por RBC e adição de RCR, respectivamente;

- os concretos com resíduos apresentaram aumento na absorção total, no índice de vazios e redução na massa específica real em relação ao concreto de referência. Estes resultados foram mais influenciados pelo aumento da relação água/material cimentício do que pela adição de resíduos;

- a absorção capilar, assim como a absorvidade, foi maior nos concretos com resíduos em relação ao concreto de referência. Assim, os concretos com resíduos terão maior probabilidade de serem deteriorados por agentes agressivos quando houver absorção por capilaridade;

- em relação à permeabilidade ao nitrogênio, para o concreto com adição de RCR houve aumento na permeabilidade em relação ao concreto de referência. Já para os concretos com o RBC e com RCR e RBC em conjunto houve redução na

permeabilidade. Porém, todos os concretos podem ser considerados de alta permeabilidade, segundo Neville (1997);

- no ensaio de penetração acelerada de íons cloreto houve aumento da carga elétrica passante no concreto com RCR e redução nos concretos com RBC e com RCR e RBC. A redução na penetração acelerada de íons cloreto nos concretos com RBC se deu devido à menor permeabilidade destes concretos e à fixação dos cloretos pelo alumínio amorfo advindo do RBC. Os concretos com resíduos e o concreto de referencia foram classificados como de alta penetração iônica segundo a ASTM C 1202 (1997);

- em relação às propriedades mecânicas, a utilização de resíduos e o aumento da relação água/material cimentício reduziram a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão em relação ao concreto de referência. Esta redução nas propriedades mecânicas ocorreu devido ao aumento do índice de vazios ocasionado pela maior relação água/material cimentício.

As considerações finais para os concretos com correção do abatimento do tronco de cone com superplastificante são:

- para os concretos com resíduos e correção do abatimento com superplastificante, a resistência à compressão aos 42 dias foi menor para os concretos somente com RCR ou RBC, bem como o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão. Já aos 180 dias, as resistências dos concretos com resíduos não foram significativamente diferentes em relação ao concreto de referência. No concreto com RCR e RBC em conjunto, em relação ao concreto de referência, houve aumento de todas as propriedades mecânicas avaliadas. Nos concretos com RBC o aumento da resistência à compressão em função do tempo foi maior, evidenciando que houve atividade pozolânica.

A partir dos estudos realizados pode-se dizer que o uso tanto do RCR quanto do RBC como adições minerais em concretos é viável, desde que estes não sejam submetidos intensamente a agentes agressivos. O uso destes resíduos pode contribuir

para a redução do consumo de cimento e agregados, bem como propiciar um destino final ao RCR e RBC.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho foram estudadas algumas características dos concretos com resíduos. Porém, são relevantes estudos complementares como:

- análise da microestrutura dos concretos;
- estudo da atividade pozolânica do RBC e dos produtos de hidratação;
- complementação dos ensaios de durabilidade com ensaios de carbonatação, abrasão, reação álcali-agregado, principalmente devido ao quartzo cristalino encontrado na difração de raios X do RCR, que pode ser um indicativo de possível reação álcali-agregado em concretos, e outros ataques químicos;
- avaliação do comportamento dos concretos com outros teores de adição de RCR e substituição do cimento pelo RBC, assim como outras relações água/material cimentício;
- uso do RCR e RBC em concretos de alto desempenho;
- uso de RCR e RBC de outros locais.

## 6. Referências Bibliográficas

- Afonso, W. M. (2005) *Caracterização de resíduo de corte de rochas na produção de argamassas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes–RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – 135 p.
- Altheman, D. (2002) *Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil*. Relatório final das atividades de Iniciação Científica apresentado ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Campinas–SP, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil – FEC/UNICAMP, 114 p.
- American Concrete Institute (2001) Committee 201.2R. *Guide to durable concrete*. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 41 p.
- American Society for Testing and Materials (1995) *Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete*. ASTM C 1012. Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials (1997) *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*: ASTM C 1202. Philadelphia.
- Andrade, T., Costa e Silva, A. J. (2005), Patologia das Estruturas. *In*: Isaia, G. C. (ed), *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp. 953-983.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica*: NBR 6508. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo - análise granulométrica*: NBR 7181 MB 32. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006) *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio*: NBR 9831. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987) *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica*: NBR 9778. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987) *Resíduos sólidos*: NBR 10004. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990) *Aglomerantes de origem mineral*: NBR 11172. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) *Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*, NBR 12142, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*: NBR 7222. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) *Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*: NBR 5739. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) *Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade*: NBR 9779. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998) *Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*: NBR NM 76. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998) *Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*: NBR NM 67. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003) *Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*: NBR 8522. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) *Agregado para concreto – especificação*: NBR 7211. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1987) *Chapa dura de fibras de madeira*: NBR 10024. Rio de Janeiro.
- Barin, D. S. (2008) *Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico*. Dissertação (Mestrado) – Santa Maria–RS, Universidade Federal de Santa Maria – 171 p.

- Cascudo, O. (2005), Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão de armadura. *In: Isaia, G. C. (ed), Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp. 1071-1108.
- Cabrera, J. G., and Lynsdale, C. J., A (1988) New gas permeometer for measuring the permeability of mortar and concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 40, N° 144, September.
- Carrasco, M. F.; Menéndez, G.; Bonavetti, V.; Irassar., E.F. (2005), *Strength optimization of "tailor-made cement" with limestone filler and blast furnace*. *Cement and Concrete Research*. V. 35, pp. 1324 – 1331.
- Centurione, S. L.; Kihara, Y.; Battagin, A. F. (2003) *Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfatos*. CD-ROM dos Anais do 47.º Congresso Brasileiro de Cerâmica – João Pessoa-PB, CBC, V. 1, pp. 123-133.
- Colleparidi, M. (1996) *Concrete deterioration from sulfate and acid attacks. Course on Durability of concrete*. *In: International Congress High-Performance concrete and Quality of Concrete Structure*. Florianópolis.
- Cordeiro, G. C (2006) *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos*. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro–RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – PEC/COPPE/UFRJ, 443 p.
- Costa, B. C. (2006) *Estudo da viabilidade técnica de incorporação de resíduo cerâmico em argamassas*. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro– UENF, 67 p.
- Coutinho, J. S. (2001) *Ataque por sulfatos* – Porto – Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 12 p.
- Dal Molin, D. C. C. (2005), Adições minerais para concreto estrutural. *In: Isaia, G. C. (ed), Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp. 345-379.
- Dias, D. P. (2001) *Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura*. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro–RJ, Instituto Militar de Engenharia – IME, 216 p.
- Evangelista, A. C. J., Almeida, V. C., Cordeiro, A. C., Alves, L. S., Rodrigues, R. A. (2004) *Aplicação de resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassa e concretos*. *Revista brasileira de ciências ambientais/ publicação do*

- Núcleo de Informações de Saúde Ambiental da Universidade de São Paulo e do Instituto de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável – n. 1, São Paulo pp. 7-12.
- Faganello, I.; Valentina, L. V. D. L.; Folgueras, M. V.; Negri, R.; Tonello, D. I. (2007), *Avaliação do desempenho de concretos obtidos com a incorporação de resíduo do corte e acabamento de chapas de mármore e granito (RMG)*. CD-ROM dos Anais do 49.º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves – RS, 16 p.
- Figueiredo, E. P. (2005) Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. *In*: Isaia, G. C. (ed), *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp. 829-855.
- Filgueiras, R. (2008) *Pedra de toque da economia mineral*. Rio Pesquisa, nº 3, pp. 26-28.
- Formagini, S. (2005) *Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*. Tese (Doutorado em engenharia Civil). Rio de Janeiro-RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. 259 p.
- Freitas Jr., J. A. (2005) *Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba*. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Curitiba-PR, Universidade Federal do Paraná – PGCC/UFPR, 133 p.
- Freitas, E. S. (2005) *Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes–RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – 81 p.
- Gallias, J. L., Kara-Ali, R., Bigas, J. P. (2000), *The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes*. Cement and Concrete Research, V. 30, pp. 1543-1549.
- Glasser, F. P.; Kindness, A.; Stronach, S. A. (1999) *Stability and solubility relationships in AFm phases: Part I. Chloride, sulfate and hydroxide*. Cement and Concrete Research 29(6), pp. 861–866.
- Gonçalves, J. P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos*. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) -

- Porto Alegre-RS, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGEC/UFRGS, 135 p.
- Gonçalves, J. P. (2005) *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial*. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, 273 p.
- Grube, H., and Lawrence, C. D. (1988) Permeability of concrete to oxygen. Proc., RILEN Seminar on Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, Univ. of Hanover, Hanover, Germany, 1988, pp. 68-79.
- Guimarães, E. L, Santos, R. D. (1999), *Avaliação do módulo de deformação do concreto em diferentes idades e com diferentes relações água/cimento*. Monografia de Especialização em Construção Civil. Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia, 57 p.
- Hall, C. (1989), *Water absorption of mortars and concretes: a review*. Magazine of Concrete Research, V. 41, Nº 147, pp. 51-61.
- Helene, P. (1993) *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. São Paulo - SP. Tese (Livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Helene, P.; Monteiro, E. B. (2003) *Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - EPUSP - São Paulo, 14 p.
- Hoppe Filho, J. (2002), *Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais*. Dissertação (Mestrado) – Santa Maria-RS, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 204 p.
- Irassar, E. F.; González, V. R. (2000) *Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana*. Cement and Concrete Research. V. 22. , pp. 361-368.
- Irassar, E.F.; Bonavetti, V.; Trezza, M.; Donza, H. (1999) *Difusión de cloruros en hormigones conteniendo cementos com filler calcáreo*. In: Congreso de Control de Calidad, 7., 1999, Montevideo. Anais... Montevideo,. 2v. v.1, pp. 297-304.

- Isaia, G. C. (2005) O concreto: da era clássica à contemporânea . In: Isaia, G. C. (ed), *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp 1-43.
- John, V. M. (2000) *Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo-SP. 102p.
- Kelham, S. A. (1988) *Water absorption test for concrete*. Magazine of Concrete Research, V. 40, N 10. Jun, pp. 106-110.
- Levy, S. M. (2001) *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – PCC/USP, 194 p.
- Lopes, A. N. M. (1999) *Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - Brasília, 170 p.
- Lynsdale, C. J., Khan, M.I. (2000), High performance-low environmental impact concrete utilizing cement replacement in ternary systems. In: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next Millennium, Friendly and Innovative Cement Based Materials*, N. P. Barbosa e R. N. Swamy (ed). João Pessoa, Brazil.
- Male (1989), *Properties of microsilica concrete: An overview of microsilica concrete em UK*. Concrete. London, v. 23, n8, sep., pp. 31-44.
- Malhotra, V. M. (2002), *Introduction: sustainable development and concrete technology*, Concrete International, v. 24, n. 7, pp. 22-30.
- Massazza, F. (1998), *Pozzolana and pozzolanic cements*. In: Hewlett, P. C. (ed), *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.
- Martys, N. S., Ferraris, C. F., (1997) *Capillary transport in mortars and concrete*. Cement and Concrete research, V. 27, N°5, pp. 747-760.
- Mehta, P. K. (2002) Greening of the concrete industry for sustainable development, Concrete International, v. 24, n. 7, pp. 23-28.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008) *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo-SP. IBRACON, 674 p.

- Moura, W. P. (2000) *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Tese (Doutorado) – Porto Alegre-RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, 232 p.
- Nepomuceno, A. A. (2005), Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. *In: Isaia, G. C. (ed), Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, pp. 793-827.
- Neville, A. M. (1997) *Propriedades do Concreto*. São Paulo, Ed. Pini, 2ªed. 828 p.
- O'Farrell, M.; Wild, S.; Sabir, B. (1999) *Resistance to chemical attack of ground brick - PC mortar. Part I: sodium sulphate solution*. Cement and Concrete Research. V. 29. pp.1781-1790.
- O'Farrell, M.; Wild, S.; Sabir, B. (2000) *Resistance to chemical attack of ground brick - PC mortar. Part II. synthetic seawater*. Cement and Concrete Research. V. 30. pp. 757-765.
- Oficemen (2006) *Agrupación de Fabricantes de Cemento de España* <http://www.oficemen.com/eventos/pdf/ProduccionMundial2006.pdf> em 01/09/2008, página mantida pelo Oficemen.
- Page, C. L.; Short, N. R.; Holden, W. R. (1986) *The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel*. Cement and Concrete Research, V.16, pp. 79-86
- Pereira, V. G. A. (2001), *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura*. Dissertação (Mestrado) – Porto Alegre-RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, 154 p.
- Petrucci, E. G. R. (1978), *Materiais de Construção*. 3ª ed. Editora Globo. Porto Alegre, 299 p.
- Rahhal, V., Talero, R.,2005, *Early hydration of portland cement with crystalline mineral additions*. Cement and Concrete Research. V. 35, pp. 1285– 1291.
- Ramos, I. S.; Alexandre, J.; Souza, I. R.; Alves, M. G.; Barroso, J. A. (2003) *Dimensionamento da indústria cerâmica de Campos dos Goytacazes-RJ*. CD ROM dos Anais do 47.º Congresso Brasileiro de Cerâmica - João Pessoa-PB.
- RETECMIN. Fábrica de argamassas de Santo Antonio de Pádua/Projetos. <http://www.cetem.gov.br/html/Retecmin.htm> acesso em 03/2007.

- Rocha, C. A. A.; Désir, J. M.; Dias, D. P.; Dantas, D. F. (2005) *Avaliação da contribuição da atividade pozolânica do resíduo de tijolo moído na resistência de argamassas*. Conferência Interamericana sobre Materiais e Tecnologias não-Convencionais na Construção Ecológica e Sustentável. IAC-NOCMAT - Rio de Janeiro-RJ, 8 p.
- Rocha, C. A. A.; Désir, J. M.; Dias, D. P.; Viana, C. E. (2006) *Estudo da durabilidade de argamassas contendo resíduos industriais*. Conferência sobre Materiais e Tecnologias Não-Convencionais na Construção Ecológica e Sustentável. NOCMAT 2006 – Salvador-BA, 12 p.
- Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J. (2001), *Metacaulim and calcined clays as pozzolanas for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites. V. 23, pp. 441– 454.
- Saboya, F. A. Jr. (2000) *Estudos sobre as qualidades de peças estruturais em cerâmica vermelha englobando propriedades tecnológicas e procedimentos de execução*. Projeto “Jovem Cientista” Desenvolvimento do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Saciloto, A. P. (2005) *Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura*. Dissertação (Mestrado) – Santa Maria-RS, Universidade Federal de Santa Maria-PPGEC/UFSM, 180p.
- Sarja, A.; Vesikari, E. (2000) *Durability design of concrete structures*. Report of Rilem Technical Committee 130-CLS, Rilem Report 14. London: E&FN SPON, pp. 14-20.
- Sato, N. M. N, Agopyan, V. (1998), *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. Boletins técnicos, PCC-USP. 20 p.
- SNIC - Press Kit (2007), *Sindicato nacional das Indústrias de Cimento* [http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2007.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2007.pdf) em 01/09/2008 página, mantida pelo SNIC.
- Teixeira, M. P. (1998) *Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – Brasília-DF, 169 p.
- Thompson, N.G.; Lawson, K.M.; Beavers, J.A. (1988) *Monitoring cathodically protected steel in concrete structures with electrochemical impedance techniques*. Corrosion. v.44, n.8, pp. 581-588.
- Tikalsky, P. J.; Carrasquillo, R. L. (1989) *The effect of fly ash on the sulfate resistance of*

- concrete*. Research report 481-5, Center of transportation research. University of Texas at Austin.
- Torralles-Carbonari, M. B.; Iramina, R.; Cavalaro, H. P. S.; Moreira, M. S. E.; Yoshida, H. H. (2004) *Durabilidade de concretos de alto desempenho produzidos com diferentes esqueletos granulares*. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - São Paulo. Anais claCS'04 e ENTAC'04, 13 p.
- Velasco, R. V. (2002), *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. Dissertação (Mestrado) – Rio de Janeiro-RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, 132 p.
- Viana, C. E. (2007) *Escórias de fluxo de soldagem como agregado miúdo para a produção de argamassas de múltiplo uso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – LECIV/UENF, 112 p.
- Vieira, A. A. P (2005), *Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos*. Dissertação (Mestrado) – João Pessoa-Pb, Universidade Federal da Paraíba – CT, 107 p.
- Wild, S.; Khatib, J. M.; O'Farrell, M. (1997) *Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures*. Cement and Concrete Research. V. 27. N. 5, pp. 697-709.
- Winck, M. L.; Isaia, G. C.; Gastaldini, A. L. G. (2000), *Estudo comparativo entre adições calcábricas e pozolânicas sobre a penetração de cloretos em concreto armado*. CD-ROM dos Anais do 42.º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza-CE.

## Anexo A: Análise de Variância (ANOVA)

A seguir são apresentados os valores de F calculados ( $F_c$ ) nas análises de variância dos resultados experimentais dos estudos conduzidos em concretos. São indicados, ainda, os valores de graus de liberdade dos tratamentos ( $GL_T$ ) e dos resíduos ( $GL_R$ ) e dos limites unilaterais de F ( $F_t$ ) ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de absorção por capilaridade do concreto de referência e com os concretos com resíduos.

Característica	$GL_T$	$GL_R$	$F_c$	$F_t$
Absorção por capilaridade (72 horas)	3	8	2,47	4,07
Absorção por capilaridade (1.416 horas)	3	8	8,76	4,07

Tabela 17 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey.

Absorção por capilaridade (1.416 horas)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	26,32	-	-
CRCR	28,24	1,92	não
CRBC	32,54	6,22	sim
CRCR/RBC	28,68	2,36	não
CRCR	28,24	-	-
CRBC	32,54	4,30	sim
CRCR/RBC	28,68	0,44	não
CRBC	32,54	-	-
CRCR/RBC	28,68	-3,86	não

Tabela 18 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.

Característica	$GL_T$	$GL_R$	$F_c$	$F_t$
Resistência à compressão (42 dias)	3	8	96,41	4,07
Resistência à compressão (170 dias)	3	8	17,23	4,07

Tabela 19 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Resistência à compressão (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	27,94	-	-
CRCR	24,02	-3,92	sim
CRBC	19,19	-8,75	sim
CRCR/RBC	20,96	-6,98	sim
CRCR	24,02	-	-
CRBC	19,19	-4,83	sim
CRCR/RBC	20,96	-3,06	sim
CRBC	19,19	-	-
CRCR/RBC	20,96	1,77	não

Tabela 20 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Resistência à compressão (170 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	28,50	-	-
CRCR	26,54	-1,97	não
CRBC	20,75	-7,75	sim
CRCR/RBC	24,56	-3,95	sim
CRCR	26,54	-	-
CRBC	20,75	-5,78	sim
CRCR/RBC	24,56	-1,98	não
CRBC	20,75	-	-
CRCR/RBC	24,56	3,80	sim

Tabela 21 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com água em função da idade.

Resistência à compressão (42 dias X 170 dias)	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
CREF	1	4	0,39	7,71
CRCR	1	4	4,46	7,71
CRBC	1	4	9,74	7,71
CRCR/RBC	1	4	19,74	7,71

Tabela 22 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Módulo de elasticidade (42 dias)	3	8	40,04	4,07
Módulo de elasticidade (170 dias)	3	8	46,25	4,07

Tabela 23 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Módulo de elasticidade (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	28,90	-	-
CRCR	27,02	-1,88	sim
CRBC	23,90	-4,99	sim
CRCR/RBC	23,38	-5,51	sim
CRCR	27,02	-	-
CRBC	23,90	-3,11	sim
CRCR/RBC	23,38	-3,64	sim
CRBC	23,90	-	-
CRCR/RBC	23,38	-0,52	não

Tabela 24 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Módulo de elasticidade (170 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	29,43	-	-
CRCR	29,76	0,32	não
CRBC	22,77	-6,67	sim
CRCR/RBC	25,99	-3,44	sim
CRCR	29,76	-	-
CRBC	22,77	-6,99	sim
CRCR/RBC	25,99	-3,76	sim
CRBC	22,77	-	-
CRCR/RBC	25,99	3,23	sim

Tabela 25 - Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Resistência à tração por compressão diametral (42 dias)	3	12	6,70	3,49

Tabela 26 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Resistência à tração por compressão diametral (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	2,90	-	-
CRCR	2,52	-0,38	não
CRBC	2,12	-0,77	sim
CRCR/RBC	2,22	-0,68	sim
CRCR	2,52	-	-
CRBC	2,12	-0,40	não
CRCR/RBC	2,22	-0,30	não
CRBC	2,12	-	-
CRCR/RBC	2,22	0,09	não

Tabela 27 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração na flexão à 4 pontos do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com água.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Resistência à tração na flexão (60 dias)	3	8	12,08	4,07

Tabela 28 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com água.

Resistência à tração na flexão (60 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	4,68	-	-
CRCR	4,45	-0,23	não
CRBC	3,81	-0,87	sim
CRCR/RBC	3,76	-0,92	sim
CRCR	4,45	-	-
CRBC	3,81	-0,64	sim
CRCR/RBC	3,76	-0,68	sim
CRBC	3,81	-	-
CRCR/RBC	3,76	-0,05	não

Tabela 29 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos com correção do abatimento com superplastificante.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Resistência à compressão (42 dias)	3	8	76,63	4,07
Resistência à compressão (170 dias)	3	8	76,74	4,07

Tabela 30 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante.

Resistência à compressão (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	27,94	-	-
CRCR	25,81	-2,13	não
CRBC	23,27	-4,67	sim
CRCR/RBC	33,44	5,50	sim
CRCR	25,81	-	-
CRBC	23,27	-2,54	sim
CRCR/RBC	33,44	7,63	sim
CRBC	23,27	-	-
CRCR/RBC	33,44	10,17	sim

Tabela 31 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante.

Resistência à compressão (170 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	28,50	-	-
CRCR	27,63	-0,87	não
CRBC	26,52	-1,99	não
CRCR/RBC	36,16	7,66	sim
CRCR	27,63	-	-
CRBC	26,52	-1,11	não
CRCR/RBC	36,16	8,53	sim
CRBC	26,52	-	-
CRCR/RBC	36,16	9,64	sim

Tabela 32 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão dos concretos com correção do abatimento com superplastificante em função da idade.

Resistência à compressão (42 dias X 170 dias)	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
CREF	1	4	0,39	7,71
CRCR	1	4	6,63	7,71
CRBC	1	4	22,28	7,71
CRCR/RBC	1	4	40,42	7,71

Tabela 33 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do concreto de referência e com os concretos com resíduos e correção do abatimento com superplastificante.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Módulo de elasticidade (42 dias)	3	8	97,71	4,07

Tabela 34 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante.

Módulo de elasticidade (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	28,90	-	-
CRCR	23,59	-5,30	sim
CRBC	19,64	-9,25	sim
CRCR/RBC	29,34	0,45	não
CRCR	23,59	-	-
CRBC	19,64	-3,95	sim
CRCR/RBC	29,34	5,75	sim
CRBC	19,64	-	-
CRCR/RBC	29,34	9,70	sim

Tabela 35 – Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência e com os concretos com resíduos e com correção do abatimento com superplastificante.

Característica	GL <sub>T</sub>	GL <sub>R</sub>	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>
Resistência à tração por compressão diametral (42 dias)	3	12	9,14	3,49

Tabela 36 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey - Concretos com correção do abatimento com superplastificante.

Resistência à tração por compressão diametral (42 dias)	Média	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
CREF	2,90	-	-
CRCR	2,88	-0,02	não
CRBC	2,47	-0,43	não
CRCR/RBC	3,67	0,77	sim
CRCR	2,88	-	-
CRBC	2,47	-0,41	não
CRCR/RBC	3,67	0,79	sim
CRBC	2,47	-	-
CRCR/RBC	3,67	1,20	sim