



*Universidade Federal da Paraíba  
Centro de tecnologia  
programa de pós-graduação em engenharia urbana  
-mestrado-*

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE  
CERÂMICA VERMELHA COMO SUBSTITUIÇÃO  
POZOLÂNICA EM ARGAMASSAS E CONCRETOS**

*por*

*Andressa de Araújo Porto Vieira*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba,  
Para a obtenção do grau de Mestre*

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de tecnologia*  
*programa de pós-graduação em engenharia urbana*  
*-mestrado-*

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA  
COMO SUBSTITUIÇÃO POZOLÂNICA EM ARGAMASSAS E CONCRETOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Andressa de Araújo Porto Vieira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa  
CO-ORIENTADOR: Ph.D. Sandro Marden Torres

V658a Vieira, Andressa de Araújo Porto

Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos./ Andressa de Araújo Porto Vieira . – João Pessoa, 2005.

107 p.: il

Inclui índice e bibliografia

Orientador: Normando Perazzo Barbosa

Co-Orientador: Sandro Marden Torres

Dissertação (mestrado.- UFPB/CT)

1. Pozolana 2. Aproveitamento de Resíduo 3. Cerâmica Vermelha 4. Durabilidade.

UFPB/BC

CDU: 666.95(043.2)

*Ao meu esposo, Fabiano, e  
à minha filha, Ana Maria, pelo amor,  
paciência, renúncia e compreensão  
durante toda esta jornada.*

*A toda a minha família e  
amigos, em especial à minha mãe,  
Sônia, e à minha sogra, Anete, pela  
confiança, incentivo e total apoio a  
mim dedicados.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus pela força, saúde e proteção.*

*Ao Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa, pela confiança e orientação deste trabalho.*

*Ao Ph.D. Sandro Marden Torres pelo incentivo, dedicação, contribuição e ensinamentos valiosos como co-orientador deste trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Eridon Celso Pereira pelos ensinamentos e contribuição valiosos prestados a este trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Gibson Rocha Meira pela contribuição e incentivo para a realização deste trabalho.*

*A todos os colegas de curso, pela amizade e apoio.*

*Aos amigos sempre presentes, Manuelina Porto e Paulo Peregrino, pela companhia, ajuda e incentivo em todos os momentos.*

*A todos que fazem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, em especial ao Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel.*

*Ao LABEME (Laboratório de Materiais e Estruturas), nas pessoas de Delby Fernandes, Luiz Ricardo, Cláudio Mathias e Zito, pelo apoio na realização da parte prática deste trabalho.*

*A CAPES-PROCAD, FINEP-CTPETRO, e CNPq pelo apoio financeiro.*

*A todos aqueles que confiaram na minha capacidade de vencer mais este desafio.*

*Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização e conclusão deste trabalho.*

**“ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA  
COMO SUBSTITUIÇÃO POZOLÂNICA EM ARGAMASSAS E CONCRETOS”**

**Por**

**ANDRESSA DE ARAÚJO PORTO VIEIRA**

**Dissertação aprovada em 27 de julho de 2005  
Período Letivo: 2005.1**

**Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA - UFPB  
Orientador**

**Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES - UFPB  
Co-orientador**

**Prof. Dr. ALUÍSIO BRAZ DE MELO – UFPB  
Examinador Interno**

**Prof. Dr. ERIDON CELSO PEREIRA – UFPB  
Examinador Externo**

**Prof. Dr. GIBSON ROCHA MEIRA – CEFET – PB  
Examinador Externo**

**Prof. Dr. ANTÔNIO FARIAS LEAL – UFCG  
Examinador Externo**

**João Pessoa –PB  
2005**

## RESUMO

Os produtos à base de cimento Portland possuem um grande potencial de promover soluções para a imobilização de resíduos industriais, as quais, além de serem economicamente viáveis, contribuem para o desenvolvimento sustentável das atividades industriais modernas. De fato, vários destes resíduos têm sido utilizados com sucesso em construções no mundo inteiro, sendo a sua grande maioria proveniente da produção de aço e energia. Todavia, a utilização deste tipo de resíduos em regiões de baixa atividade industrial, como o Nordeste do Brasil, pode se tornar economicamente inviável em razão dos custos relativos ao seu transporte. Nesta região em especial, a indústria de cerâmica vermelha é uma das principais atividades industriais e poucas foram as contribuições para o seu crescimento sustentável, embora alguns pesquisadores venham sugerindo que seus resíduos, quando moídos, podem promover melhorias em algumas propriedades de misturas de cimento contendo esta adição. Entretanto, de modo a implementar uma efetiva estratégia para a utilização destes resíduos, um maior número de pesquisas precisa ser efetuado, avaliando o potencial de imobilização destes resíduos em sistemas contendo cimento Portland. Deste modo, a presente pesquisa: investigou o efeito da finura na atividade pozolânica de resíduos de cerâmica vermelha moídos (RC), comparando-os com uma pozolana convencional utilizada pela indústria de cimento (FC); avaliou o efeito da substituição do cimento por RC na reologia, propriedades mecânicas e permeabilidade de argamassas e concretos e na corrosão de armaduras de concretos. Foram moldadas amostras de argamassas e concretos contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC (0%, 20% e 40%) em peso. O fator água/aglomerante foi mantido constante (0,5) tanto nas misturas relativas as argamassas (1:1,55), quanto aos concretos (1:1,55:2,19). As amostras foram inicialmente curadas em água em duas temperaturas distintas (ambiente – cerca de 23°C e 55°C) por 7 dias, em ambiente de laboratório até os 21 dias, e posteriormente imersas nas soluções de teste (água pura e solução salina de NaCl a 3,5%). As composições mineralógicas do RC e da pozolana FC foram obtidas por análise de difração de Raios-X. O cimento utilizado foi o CPII-F 32 (Cimento Portland com Filler com 10% de  $\text{CaCO}_3$ ). No tocante aos parâmetros relacionados à estrutura porosa de argamassas e concretos contendo RC, apenas as primeiras apresentaram resultados satisfatórios. Com relação à performance mecânica dos concretos avaliados, embora a substituição parcial do cimento por RC na confecção dos mesmos em teores de 20% e 40% tenha provocado uma redução de sua resistência à compressão simples, esta redução não foi proporcional ao teor de substituição utilizado, haja vista que, amostras contendo 40% de substituição ainda retiveram 89% da resistência das amostras de controle, em razão da satisfatória atividade pozolânica do resíduo além de seu efeito filler. A diluição do cimento em decorrência de sua substituição por RC pareceu afetar a alcalinidade das matrizes estudadas, reduzindo seus pH's, principalmente em ambientes salinos, o que pode ser um indicativo de uma maior predisposição destas matrizes a problemas de durabilidade em decorrência da corrosão das armaduras envoltas pelas mesmas.

**Palavras-Chave:** Cerâmica Vermelha Moída, Pozolana, Durabilidade, Corrosão.



## ABSTRACT

Portland cement based materials have great potential for providing good waste immobilization solutions, which are both cost effective and also promotes the sustainable development of modern industrial activities. Indeed, several industrial wastes have successfully been used in constructions worldwide, most of them from steel and energy manufacturing processes. Nevertheless, transportation, when needed in places where industrial activities are still incipient can affect the cost effectiveness of its use. In such places, such as in the Northeast of Brazil, red clay bricks industry is chiefly predominant, and little is done for its sustainable development. Even though, some researches have been suggesting that their waste, when ground, can improve some properties of cement based materials. However, in order to implement an effective strategy for its use, more research needs to be done, evaluating the potential immobilization of such waste in systems containing Portland cement. Therefore, the current research: investigated the effect of the finesse on the pozzolanic activity of ground red clay bricks (RC), comparing with a conventional cement industry pozzolan (FC); evaluated the effect of the replacement of cement by RC on the fresh and hardened mechanical properties and permeability in mortar and concrete and on the corrosion of steel reinforcement in concretes. Mortar and concrete samples were cast with different levels of RC replacing cement (0%, 20% and 40%) by mass. The water to binder ratio was kept constant (0.50) in both mix proportions of mortar (1:1,55) and concrete (1:1,55:2,19). The samples were initially cured in water at two different temperatures (room – around 23°C - and 55° C) for 7 days, in air for 21 days, and lately immersed in test solutions (water and 3.5% NaCl solution). The mineralogical compositions of RC and the pozzolan FC were obtained by X-Ray diffraction analysis. The cement used was a CPII-F 32 (Portland Limestone Cement with c.a. 10% of CaCO<sub>3</sub>). When the parameters related to the porous structure of mortars and concretes containing RC were considered, it can be observed that only mortars presented satisfactory results. With respect to the investigated concretes mechanical performance, it was concluded that, although the use of RC in replacement levels of 20% and 40% had reduced the compressive strength of these concretes, this reduction wasn't proportional to the used replacement level. Indeed samples containing 40% retained 89% of the of the concrete control mix, without replacement, due to its satisfactory pozzolanic activity and filler effect. The dilution of cementitious material by its replacement for RC appears to affect the alkalinity of the studied matrices, reducing its pH's, which can be an indicative of a major predisposition of these matrices to durability problems due the corrosion of its steel reinforcing.

**Keywords:** Ground Red Clay Brick, Pozzolan, Durability, Corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1:</b> <i>Panteon de Roma.</i>  | 23 |
| <b>Figura 2.2:</b> <i>Aqueduto de Pont du Gard, França.</i>   | 23 |
| <b>Figura 2.3:</b> <i>Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potenciais <math>\log a_{\text{H}^+}</math> para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade (CASCUDO, 1997).</i> | 36 |
| <b>Figura 2.4:</b> <i>Variação esquemática do pH em soluções e os equilíbrios iônicos da reações da tabela 4.15.</i>  | 42 |
| <b>Figura 2.5:</b> <i>Equações de equilíbrio do pH de uma solução salina na qual se encontra imersa uma amostra de concreto contendo material pozolânico.</i>   | 43 |
| <b>Figura 2.6:</b> <i>Esquema de um dispositivo convencional para medida dos potenciais de corrosão (CASCUDO, 1997).</i>  | 46 |
| <b>Figura 2.7:</b> <i>Sistema para medidas de resistência de polarização (CASCUDO, 1997)</i>  | 49 |
| <b>Figura 2.8:</b> <i>Moinho de Bolas Modelo SONEX I-4205 da CONTENCO</i>   | 51 |
| <b>Figura 3.1:</b> <i>Resíduo da indústria cerâmica.</i>  | 57 |
| <b>Figura 3.2:</b> <i>Pozolana FC antes do beneficiamento.</i>  | 58 |
| <b>Figura 3.3:</b> <i>Resíduo Cerâmico após a britagem no Aparelho de Los Angeles.</i>  | 61 |
| <b>Figura 3.4:</b> <i>Ensaio de início e fim de pega utilizando o Aparelho de Vicat.</i>  | 63 |
| <b>Figura 3.5:</b> <i>Ensaio de absorvidade.</i>  | 67 |
| <b>Figura 3.6:</b> <i>Controle do nível de água no ensaio de absorvidade.</i>   | 67 |
| <b>Figura 3.7:</b> <i>Ferragem utilizada na confecção dos corpos-de-prova utilizados para as medidas eletroquímicas.</i>  | 69 |
| <b>Figura 3.8:</b> <i>Moldagem dos corpos-de-prova utilizados para as medidas eletroquímicas.</i>   | 69 |
| <b>Figura 3.9:</b> <i>Corpos-de-Prova utilizados para as medidas eletroquímicas.</i>  | 70 |
| <b>Figura 3.10:</b> <i>Desenho esquemático da amostra em solução.</i>   | 71 |
| <b>Figura 3.11:</b> <i>Grupo (a) subgrupo (b) de amostras imersas em solução.</i>   | 71 |
| <b>Figura 3.12:</b> <i>Execução das medidas de potencial de corrosão.</i>   | 72 |
| <b>Figura 4.1:</b> <i>Variação da finura do resíduo cerâmico e da pozolana FC com o tempo de moagem conforme a carga da carga de bolas utilizada.</i>   | 74 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.2:</b> Espectro de difração de Raios-X do resíduo cerâmico moído: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline.                              | 76 |
| <b>Figura 4.3:</b> Espectro de difração de Raios-X da pozolana FC: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline.   | 77 |
| <b>Figura 4.4:</b> Variação dos índices de atividade pozolânica com cimento e com cal com a finura do RC.   | 83 |
| <b>Figura 4.5:</b> Efeito do teor de substituição do cimento e da variação da finura nos tempos de pega de pastas contendo RC.  | 85 |
| <b>Figura 4.6:</b> Variação da consistência das argamassas com o teor de substituição de RC.  | 87 |
| <b>Figura 4.7:</b> Variação da porosidade total com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de argamassas contendo RC.  | 88 |
| <b>Figura 4.8:</b> Variação do índice de vazios com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de argamassas contendo RC.  | 89 |
| <b>Figura 4.9:</b> Corpos-de-Prova de argamassas contendo resíduo cerâmico curados à temperatura ambiente (grupo da direita na foto menor) e à 55 °C (grupo da esquerda na foto menor e detalhe à direita). | 90 |
| <b>Figura 4.10:</b> Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo, médias para as argamassas curadas à temperatura ambiente.   | 91 |
| <b>Figura 4.11:</b> Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo, médias para as argamassas curadas à temperatura de 55°C.  | 92 |
| <b>Figura 4.12:</b> Variação da absorvidade com o teor de substituição e temperatura de cura das argamassas contendo RC   | 93 |
| <b>Figura 4.13:</b> Trabalhabilidade de concretos com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico.   | 94 |
| <b>Figura 4.14:</b> Resistência à Compressão Simples (RCS) de concretos contendo resíduo de cerâmica vermelha (CRC) com diferentes teores de substituição do cimento curados à temperatura ambiente.        | 95 |
| <b>Figura 4.15:</b> Resistência à Compressão Simples (RCS) de concretos contendo resíduo de cerâmica vermelha (CRC) com diferentes teores de substituição do cimento curados a 55oC.                        | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 4.16:</b> <i>Curvas de Abrams de concretos de cimentos com e sem substituição por resíduo cerâmico.</i>   | 98  |
| <b>Figura 4.17:</b> <i>Variação da porosidade total com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de concretos contendo RC</i>  | 101 |
| <b>Figura 4.18:</b> <i>Variação do índice de vazios com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de concretos contendo RC</i>  | 101 |
| <b>Figura 4.19:</b> <i>Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo: médias para os concretos curados à temperatura ambiente.</i>   | 103 |
| <b>Figura 4.20:</b> <i>Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo: médias para os concretos curados à 55 °C</i>   | 103 |
| <b>Figura 4.21:</b> <i>Variação da absorvidade com o teor de substituição e temperatura de cura de concretos contendo RC: Estágio A.</i>  | 104 |
| <b>Figura 4.22:</b> <i>Variação da absorvidade com o teor de substituição e temperatura de cura de concretos contendo RC: Estágio B.</i>  | 105 |
| <b>Figura 4.23:</b> <i>Variação com tempo do pH da água contendo concretos com diferente teores de resíduo cerâmico.</i>  | 107 |
| <b>Figura 4.24:</b> <i>Variação com tempo do pH da solução salina (NaCl) contendo concretos com diferente teores de resíduo cerâmico.</i>   | 107 |
| <b>Figura 4.25:</b> <i>Variação esquemática do pH em soluções e os equilíbrios iônicos da reações da tabela 4.15.</i>   | 108 |
| <b>Figura 4.26:</b> <i>Variação do potencial de corrosão com o tempo em função do teor de substituição do cimento por RC: (amostras imersas em solução salina): símbolos fechados; (amostras imersas em água): símbolos abertos.</i>        | 111 |
| <b>Figura 4.27:</b> <i>Variação da taxa de corrente de corrosão com o tempo em função do teor de substituição do cimento por RC: (amostras imersas em solução salina): símbolos fechados; (amostras imersas em água): símbolos abertos.</i> | 114 |
| <b>Figura 4.28:</b> <i>Relação entre os valores de potencial e taxa de corrente de corrosão obtidos para amostras contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC submetidas a imersão em água.</i>                            | 116 |
| <b>Figura 4.29:</b> <i>Relação entre os valores de potencial e taxa de corrente de corrosão obtidos para amostras contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC submetidas a imersão em solução salina.</i>                  | 116 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabela 2.1: Principais compostos do cimento Portland.</i>   | 25 |
| <i>Tabela 2.2: Equações Químicas no equilíbrio e seus respectivos pHs (Torres, 2004).</i>  | 42 |
| <i>Tabela 2.3: Avaliação dos resultados obtidos mediante a técnica de medidas de potenciais de eletrodo, em estruturas de concreto armado, segundo a ASTM C-876.</i> | 46 |
| <i>Tabela 2.4: Critérios de Avaliação da Velocidade de Corrosão</i>  | 50 |
| <i>Tabela 3.1: Ensaio realizados em função dos objetivos específicos.</i>  | 54 |
| <i>Tabela 3.2: Caracterização Química do Cimento CPIIF-32 POTY.</i>  | 55 |
| <i>Tabela 3.3: Caracterização Física do Cimento CPIIF-32 POTY.</i>   | 56 |
| <i>Tabela 3.4: Carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho (Carga 1).</i>  | 59 |
| <i>Tabela 3.5: Carga de bolas de volume equivalente a 12% do volume interno do moinho (Carga 2).</i>   | 61 |
| <i>Tabela 3.6: Proporção e consumo dos materiais utilizados no programa experimental.</i>  | 65 |
| <i>Tabela 3.7: Soluções de imersão avaliadas.</i>  | 70 |
| <i>Tabela 4.1: Finura Blaine das pozolanas em função da carga de bolas utilizada para moagem.</i>  | 73 |
| <i>Tabela 4.2: Composição química do Resíduo Cerâmico RC (% em massa)</i>  | 75 |
| <i>Tabela 4.3: Composição mineralógica das pozolanas de acordo com os padrões difratométricos.</i>   | 77 |
| <i>Tabela 4.4: Massas específicas das pozolanas.</i>   | 78 |
| <i>Tabela 4.5: IAP com cal do RC e sua variação com a finura.</i>  | 79 |
| <i>Tabela 4.6: IAP com cal da pozolana FC e sua variação com a finura.</i>   | 79 |
| <i>Tabela 4.7: IAP com cimento do RC e sua variação com a finura.</i>  | 81 |
| <i>Tabela 4.8: IAP com cimento da Pozolana FC e sua variação com a finura.</i>   | 81 |
| <i>Tabela 4.9: Resultados obtidos no ensaio de início e fim de pega segundo a NBR11581 [ABNT 2001].</i>  | 84 |
| <i>Tabela 4.10: Variação da porosidade total, índice de vazios e massa</i>   | 88 |

*específica com o teor de substituição e com a temperatura de cura de argamassas contendo RC.*

***Tabela 4.11:*** Absortividade das argamassas contendo RC segundo a temperatura de cura. 92

***Tabela 4.12:*** Relação  $p_z/c$ ,  $C_{eq}$ ,  $a/c$ ,  $a/C_{eq}$  e resistência à compressão de concretos contendo RC. 98

***Tabela 4.13:*** Porosidade total, índice de vazios e massa específica de concretos contendo RC de acordo com a temperatura de cura 100

***Tabela 4.14:*** Absortividade dos concretos contendo RC segundo a temperatura de cura. 104

***Tabela 4.15:*** Equações Químicas no equilíbrio e seus respectivos pHs (Torres, 2004). 108

***Tabela 4.16:*** Períodos distintos de condições de exposição das amostras utilizadas nos ensaios de medidas eletroquímicas. 111

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>Capítulo 1 – Introdução</b>   | 17 |
| <b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>                                  | 22 |
| <b>2.1 Introdução</b>  | 22 |
| <b>2.2 O Uso da Pozolana no Cimento Portland</b>                           | 23 |
| 2.2.1 Interações entre a Pozolana e o Cimento Portland                     | 24 |
| 2.2.2 Efeitos da Pozolana nas Propriedades de Engenharia                   | 28 |
| 2.2.3 Durabilidade de Concretos Contendo Pozolana                          | 32 |
| <b>2.3 Corrosão</b>  | 35 |
| 2.3.1 Mecanismos da Corrosão no Concreto                                   | 36 |
| 2.3.2 O Papel das Adições Pozolânicas no Processo de Corrosão em Concretos | 40 |
| 2.3.3 Avaliação do Processo de Corrosão em Concretos                       | 44 |
| <b>2.4 Cominuição</b>  | 50 |
| 2.4.1 Moagem em Moinho de Bolas  | 50 |
| <b>Capítulo 3 – Materiais e Métodos</b>                                    | 53 |
| <b>3.1 Materiais</b>   | 55 |
| 3.1.1 Cimento  | 55 |
| 3.1.2 Agregado Miúdo   | 56 |
| 3.1.3 Agregado Graúdo  | 56 |
| 3.1.4 Água   | 56 |
| 3.1.5 Resíduo da Indústria Cerâmica  | 57 |
| 3.1.6 Pozolana Fornecida pelo Fabricante de Cimento (FC)                   | 57 |
| <b>3.2 Métodos</b>   | 59 |
| 3.2.1 Moagem do Resíduo da Indústria Cerâmica                              | 59 |
| 3.2.2 Moagem da Pozolana Fornecida pelo Fabricante de Cimento (FC)         | 62 |
| 3.2.3 Caracterização do Resíduo da Indústria Cerâmica                      | 62 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.2.4  | <i>Caracterização da Pozolana FC</i>   | 62 |
| 3.2.5  | <i>Ensaio de Início e Fim de Pega</i>  | 63 |
| 3.2.6  | <i>Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cal</i>  | 63 |
| 3.2.7  | <i>Dosagem dos Concretos e Argamassas</i>  | 64 |
| 3.2.8  | <i>Ensaio de Absorção</i>  | 65 |
| 3.2.9  | <i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples de Concretos</i>                                 | 67 |
| 3.2.10 | <i>Medidas Eletroquímicas: pHs das Soluções de Imersão, Potenciais e Correntes de Corrosão</i> | 68 |

## **Capítulo 4 – Resultados e Discussão** 73

### **4.1 Beneficiamento do Resíduo Cerâmico (RC) e da Pozolana FC** 73

### **4.2 Caracterização do Resíduo Cerâmico e da Pozolana FC** 75

#### *4.2.1 Análise Química* 75

#### *4.2.2 Análise Mineralógica* 76

#### *4.2.3 Massa Específica* 78

### **4.3 Efeito da Variação da Finura nos Índices de Atividade Pozolânica do Resíduo Cerâmico e da Pozolana FC** 79

#### *4.3.1 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com Cal* 79

#### *4.3.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento* 80

#### *4.3.3 Correlação entre os Índices de Atividade Pozolânica Obtidos* 82

### **4.4 Efeito da Variação da Finura nos Tempos de Pega de Pastas de Cimento Contendo RC** 83

### **4.5 Influência do Teor de Substituição e da Temperatura de Cura na Absorção de Argamassas Contendo Resíduo Cerâmico** 86

#### *4.5.1 Variação da Consistência das Argamassas pela Adição do RC* 86

#### *4.5.2 Porosidade Total, Índice de Vazios e Massa Específica* 87

#### *4.5.3 Absortividade* 90

### **4.6 Influência do Teor de Substituição Parcial do Cimento e da Temperatura de Cura em Concretos contendo RC** 94

#### *4.6.1 Variação da Consistência dos Concretos pela Adição do RC* 94

#### *4.6.2 Resistência à Compressão Simples dos Concretos Contendo RC* 95

#### *4.6.3 Absorção dos Concretos Contendo RC* 99



|  |                   |
|--|-------------------|
| <b><i>4.7 Influência do Teor de Substituição do Cimento pelo Resíduo em Parâmetros Relacionados à Corrosão das Armaduras de Concretos Submetidos ao Ataque de Cloretos</i></b> | <b><i>106</i></b> |
| <i>4.7.1 Avaliação do pH da Solução de Imersão</i>   | <i>106</i>        |
| <i>4.7.2 Avaliação do Potencial e Corrente de Corrosão</i>   | <i>110</i>        |
| <br>   |                   |
| <b><i>Capítulo 5 – Conclusões</i></b>  | <b><i>119</i></b> |
| <br>   |                   |
| <b><i>Capítulo 6 – Referências Bibliográficas</i></b>  | <b><i>124</i></b> |

## *Capítulo 1 – Introdução*

---

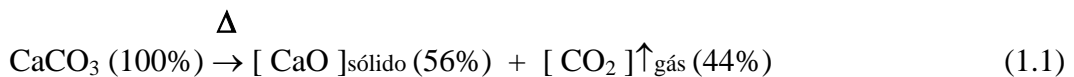
No último século, grandes mudanças sociais ocorridas em razão das revoluções tecnológicas, evolução industrial, crescimento populacional e urbanização mundial, resultaram em um acentuado consumo de matérias-primas e fontes de energia não renováveis, poluição do meio ambiente e geração incontida de resíduos. Como consequência fundamental destas mudanças globais o mundo vem enfrentando uma crise de infraestrutura jamais vista pela humanidade, ocasionada pelo aquecimento global e suas consequências ao meio ambiente, conflito humano e pobreza (SWAMY, 2000).

Segundo o mesmo autor, cabe à indústria da construção civil um papel fundamental na geração e renovação dessa infraestrutura. Deste modo, uma vez que a tecnologia dessa indústria encontra-se intimamente interligada com materiais, energia e recursos, uma degradação ambiental irreversível só poderá ser prevenida através do crescimento sustentável da mesma, cujo alcance se dará à medida que os materiais por ela produzidos e utilizados e as estruturas por ela projetadas e construídas sejam duráveis, de baixo custo e amigáveis ao meio ambiente.

Nesse contexto, um dos desafios para os pesquisadores da atualidade, na busca pelo desenvolvimento sustentável, seria então a investigação de processos para a obtenção de materiais alternativos, que permitam o emprego de resíduos urbanos diversos na fabricação de materiais e produtos duráveis, destinados, por exemplo, à construção de moradias populares de baixo custo.

O concreto é atualmente o material mais utilizado pela indústria da construção em todo o mundo, em razão de suas indiscutíveis vantagens quando comparado a outros materiais. Mas esta enorme utilização (seu consumo mundial apenas é superado pelo consumo de água), em especial nos grandes centros urbanos, trouxe como consequência um aumento vertiginoso da indústria produtora de cimento Portland. Os impactos ambientais ocasionados pela extração de argila e calcário, suas principais matérias-primas, o alto consumo energético e a elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera são os efeitos considerados mais danosos dessa indústria. Estima-se que para cada tonelada de cimento produzida uma outra tonelada de dióxido de carbono seja lançada no ar, contribuindo desta forma para o aumento do aquecimento global (ALVES, 2002; METHA & MONTEIRO, 1994).

De fato, em razão da descarbonização do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) durante sua calcinação (equação 1.1) e da combustão necessárias no seu processo de produção, a indústria do cimento é atualmente responsável por cerca de 7% da emissão mundial de dióxido de carbono (TOLEDO FILHO *et al.*, 2001).



Estes aspectos inerentes à produção do cimento têm feito de sua indústria um dos principais assuntos de importantes discussões internacionais tais como a Convenção do Rio de Janeiro, em 1992, e o acordo de Kyoto, em 1997. Dentre as iniciativas para a redução de gases poluentes, a indústria européia tem proposto o aumento do uso de materiais de substituição do clínquer, em especial, o filler calcário, cujo teor de substituição pode atingir 35%. No entanto, recentes pesquisas têm provado que estes cimentos, embora ecologicamente amigáveis, são particularmente susceptíveis a ação de águas agressivas. Conseqüentemente, se faz extremamente necessário não somente investigar o desempenho mecânico dos materiais de substituição do clínquer como também os efeitos destas substituições na durabilidade dos concretos (TORRES, 2004).

De fato, a durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido um aspecto bastante preocupante, uma vez que problemas de degradação do material têm se tornado freqüentes nos edifícios e obras d'arte atuais, principalmente naqueles localizados em grandes centros industriais e urbanos, zonas marítimas e demais ambientes hostis, em virtude da enorme quantidade de agentes agressivos neles presentes.

Estes problemas, em sua grande maioria, são devidos à permeabilidade dos concretos, que permite a penetração destes agentes. Este ingresso afeta tanto a integridade da matriz de cimento quanto à das armaduras, comprometendo suas performances e implicando em altos custos econômicos e humanos associados com falhas prematuras e repentinas deste material. Nos países mais desenvolvidos os custos com reparos, reforços e substituições em estruturas devidos a falhas dos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento das construções, sendo 40% dos recursos disponíveis para a construção civil destinados a este propósito (METHA & MONTEIRO, 1994). Além disso, novas demandas para a imobilização de resíduos urbanos especiais, como, por exemplo, os radioativos, têm requerido uma apreciação de servicibilidade tão prolongada quanto centenas de anos.

Benefícios relativos à preservação do meio ambiente e ao incremento da durabilidade do concreto, contribuindo deste modo para a sustentabilidade, podem advir da substituição parcial do cimento por resíduos industriais com propriedades pozolânicas como a microssílica, as escórias de alto forno, as cinzas de cascas de arroz, as cinzas volantes e as argilas calcinadas, cada um deles com suas peculiaridades físico-químicas.

Em regiões de baixa atividade industrial, a indisponibilidade local da grande maioria destes resíduos reconhecidamente pozolânicos torna a sua utilização economicamente inviável. Por outro lado, dentre as atividades industriais mais comuns em regiões menos desenvolvidas está a produção de derivados da cerâmica vermelha calcinada. No Estado da Paraíba, por exemplo, a produção de cerâmica vermelha, caracterizada por blocos cerâmicos, tijolos e

telhas, é bastante considerável. Porém, sem o devido controle no processo de fabricação, a quantidade de rejeitos pode chegar a mais de 10% do total da produção<sup>1</sup>, sendo os mesmos lançados aleatoriamente na natureza, provocando inúmeros danos ao meio ambiente.

Mais recentemente, investigações têm sugerido que os resíduos da indústria cerâmica, quando moídos, dispõem de certa atividade pozolânica, com potencial para a produção de concretos com reduzido impacto ambiental. No entanto, a maioria destas investigações tem fornecido dados concernentes a performance mecânica de argamassas e concretos contendo esse tipo de adição. Embora as reações pozolânicas envolvendo resíduos cerâmicos moídos e cimento possam promover uma estrutura mais homogênea e densa, conseqüentemente menos permeável, existe uma grande variabilidade na composição deste resíduo advinda de fatores como, por exemplo, a homogeneidade e temperatura da queima e a composição da matéria prima, que podem interferir na capacidade destes resíduos afetarem positivamente determinadas características dos concretos.

Deste modo, este trabalho busca analisar um resíduo cerâmico do estado da Paraíba como matéria-prima para a obtenção de um aditivo mineral pozolânico, a ser utilizado como substituto parcial do cimento na confecção de concretos cujas propriedades de durabilidade se mostrem melhoradas em razão desta adição, propiciando um duplo benefício ao meio ambiente: imobilizar este rejeito industrial, agregando-lhe valor, e reduzir o consumo de cimento, inerentemente forte emissor de CO<sub>2</sub> na atmosfera e consumidor de recursos naturais.

Uma revisão da literatura pertinente às pesquisas envolvendo este tipo de resíduo como substituto parcial do cimento revelou a existência de extensivos estudos acerca dos benefícios incorporados às propriedades mecânicas de argamassas e concretos contendo esta adição. Entretanto, uma vez que as

---

<sup>1</sup> A ABCERAM (Associação Brasileira de Cerâmica) estima um índice médio de 30% de perdas. Porém, este valor é bastante discutido, haja vista que depende do nível tecnológico de cada indústria em cada região, matéria-prima utilizada, qualidade e escolaridade da mão-de-obra, entre outros (GONÇALVES, 2005).

propriedades avaliadas nestes estudos parecem variar bastante em função das características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos utilizados, percebe-se a necessidade da devida caracterização e análise destes resíduos segundo os diversos aspectos inerentes à sua utilização como substituto parcial do cimento, de modo a contribuir para a geração de um banco de dados nacional relacionado a este tema em questão, cujas informações possam servir de parâmetros para as demais pesquisas relacionadas neste contexto.

Com relação aos efeitos desta substituição na longevidade destes novos materiais, poucos e recentes trabalhos foram observados. As propriedades relativas à durabilidade, e os efeitos dos agentes agressivos externos nestas propriedades, ainda precisam ser intensa e profundamente investigados. A corrosão das armaduras ocasionada pelo ataque de cloretos é um deles. O efeito da variação da temperatura de cura nas propriedades de argamassas e concretos contendo pozolanas provenientes de resíduos da indústria de cerâmica vermelha e a atuação desta adição nos tempos de pega das misturas merece ser melhor investigado. Além do mais, o aspecto energético relativo ao beneficiamento destes resíduos através da sua moagem também deve ser considerado.

Um programa experimental foi então definido visando não apenas obter informações técnico-científicas sobre o resíduo que se deseja analisar, vislumbrando a sua utilização como substituto parcial do cimento na confecção de argamassas e concretos, mas também elucidar as principais questões levantadas pela revisão da literatura. Deste modo, os objetivos específicos deste estudo são:

- a) beneficiar os resíduos de cerâmica vermelha através da sua moagem e estudar as propriedades pozolânicas dos resíduos moídos;
- b) estudar o efeito teor de substituição do cimento e da finura do resíduo moído nas propriedades nos estados fresco e endurecido de pastas, argamassas e concretos contendo esta adição;

- c) estudar o efeito do teor de substituição do cimento e da temperatura de cura na estrutura porosa de argamassas e concretos contendo este resíduo;
  
- d) estudar o efeito do teor de substituição do cimento pelo resíduo na corrosão das armaduras de concretos submetidos ao ataque de cloretos;

Para tanto, o presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo I consta da presente introdução.

O Capítulo II trata da fundamentação teórica, relatando estudos com informações a respeito dos parâmetros utilizados neste trabalho e identificando outras abordagens existentes sobre o assunto estudado, ou correlacionadas ao mesmo.

No capítulo III são apresentados os procedimentos metodológicos que conduziram este trabalho, estabelecendo-se os parâmetros julgados de maior relevância para a pesquisa.

No Capítulo IV os resultados obtidos em função dos procedimentos experimentais descritos no Capítulo III são apresentados e discutidos.

Por fim, as conclusões gerais derivadas deste estudo encontram-se apresentadas no Capítulo V.

Este trabalho faz parte de um acordo de cooperação com a COPPE-UFRJ, que estuda as argilas calcinadas de diversas origens como material de substituição do cimento.

## *Capítulo 2 – Fundamentação Teórica*

---

### **2.1 Introdução**

Relatos acerca das primeiras construções desenvolvidas pelo homem há aproximadamente 10.000 anos indicam que a terra argilosa foi provavelmente o primeiro material ligante utilizado. A cal surge posteriormente, descoberta ao que tudo indica, pela civilização grega, uma das pioneiras na utilização deste material como aglomerante, difundindo uma prática que supostamente se iniciou em Creta (ALVES, 2002; ZAMPIERI, 1989).

Tanto os gregos quanto os romanos sabiam que certos materiais vulcânicos, quando finamente moídos e misturados à cal e à areia, proporcionavam argamassas de maior resistência, que exibiam capacidade de endurecer sob a água e resistir à sua ação. Uma vez que os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do Monte Pozzuoli, atribuiu-se a esses materiais a designação de pozolanas, termo que mais recentemente foi também estendido a outros materiais, naturais ou artificiais, que exibem comportamento semelhante (ZAMPIERI, 1989).

Deste modo, antes do surgimento do cimento Portland, em 1824, argamassas e concretos eram produzidos usando-se uma mistura de materiais pozolânicos e cal. Solos argilosos calcinados, na forma de fragmentos de materiais cerâmicos moídos, foram as primeiras pozolanas artificiais e, misturados à cal, constituíram, há cerca de 3.600 anos, o primeiro cimento hidráulico produzido



pelo homem. Com o advento do cimento Portland, essas misturas caíram em desuso, mas sua durabilidade pode ser comprovada pelas inúmeras estruturas construídas com esses cimentos e que ainda existem em toda a Europa (Figura 2.1 e Figura 2.2) (COOK, 1986 *apud* FARIAS FILHO *et al.*, 2000).



**Figura 2.1: Panteon de Roma.**



**Figura 2.2: Aqueduto de Pont du Gard, França.**

## **2.2 O Uso da Pozolana no Cimento Portland**

A princípio, o cimento Portland pode se constituir unicamente de fragmentos de clínquer e de uma substância reguladora do tempo de pega (normalmente sulfato de cálcio), caracterizando o que se convencionou denominar cimento Portland comum. Mas dois tipos de materiais se consagraram em todo o mundo por sua vantajosa adição ao clínquer Portland, resultando em suas formas compostas: as escórias de alto forno, subproduto da fabricação do ferro gusa, e os materiais pozolânicos, tendo sido a utilização destes últimos motivada pelo desempenho das antigas argamassas romanas. De fato, as argilas calcinadas foram as primeiras pozolanas utilizadas como adição mineral ao cimento Portland, a partir de 1909, na Inglaterra, no que se denominou de cimento vermelho de Potter (ZAMPIERI, 1989).

No Brasil, o primeiro registro da utilização de material pozolânico remonta ao período da construção da barragem de Jupia (MS) em 1964, mas somente em 1969 ocorreu a comercialização do chamado cimento Portland pozolânico, o qual utilizava cinzas volantes coletadas na termelétrica de Charqueadas (RS). No período entre 1975 e 1982 várias cimenteiras produziram cimentos pozolânicos com incorporação de argilas calcinadas. Hoje em dia, por razões econômicas, observa-se o emprego de pozolanas disponíveis regionalmente (ZAMPIERI, 1989).

Atualmente têm se intensificado, em todo o mundo, pesquisas visando a obtenção e o beneficiamento de pozolanas de baixo custo a partir de subprodutos industriais, com vistas à sua utilização como substitutas parciais do cimento Portland em argamassas e concretos. Segundo estes estudos, estas substituições implicam em um duplo benefício para o meio ambiente, uma vez que agrega valor a resíduos cuja exposição na natureza é fonte de degradação ambiental e reduz o consumo de cimento, cuja problemática ambiental provocada pela sua produção já foi discutida no Capítulo I. A metacaulinita, as cinzas da casca de arroz e os resíduos de cerâmica vermelha moídos são exemplos de materiais estudados com este propósito.

### **2.2.1 Interações entre a Pozolana e o Cimento Portland**

O cimento Portland é constituído por um certo número de compostos cujas reações com a água dão origem ao processo de endurecimento. Quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes deste aglomerante, os quais encontram-se discriminados na Tabela 2.1.

Cada composto de cimento reage com a água, liberando calor e formando cristais correspondentes a cada uma das três fases sólidas principais geralmente presentes na pasta endurecida, além dos grãos de clínquer não hidratados.

Tabela 2.1: Principais compostos do cimento Portland.

| Nome do Composto            | Composição em Óxidos                                      | Abreviações           |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Silicato Tricálcico         | $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_3\text{S}$  |
| Silicato Dicálcico          | $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_2\text{S}$  |
| Aluminato Tricálcico        | $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$                       | $\text{C}_3\text{A}$  |
| Ferroaluminato Tetracálcico | $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_4\text{AF}$ |

A fase silicato de cálcio hidratado, abreviada para C-S-H, constitui cerca de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo responsável pela alta resistência mecânica à compressão da mesma (METHA & MONTEIRO, 1994).

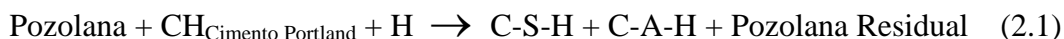
Os cristais de hidróxido de cálcio, na química do cimento abreviados por CH, são grandes e frágeis, constituindo de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada. Ao contrário do C-S-H, o CH não contribui potencialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida. Além disso, a presença de uma quantidade considerável destes cristais no cimento Portland tem um efeito desfavorável sobre a resistência química a soluções ácidas, em razão da sua alta solubilidade (METHA & MONTEIRO, 1994).

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 20% a 15% do volume de sólidos da pasta endurecida, desempenhando um papel menor nas relações estrutura-propriedade (METHA & MONTEIRO, 1994).

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que o CH é, pois, o ponto fraco da estrutura da pasta de cimento, visto que, sendo o mesmo um produto solúvel, pode ser lixiviado, deixando a estrutura porosa e resultando não apenas na diminuição da resistência, mas também no aumento de sua permeabilidade, com conseqüências negativas para a durabilidade da mesma.

A pozolana, quando introduzida neste sistema, reage com o CH da pasta de cimento, não apenas consumindo-o ao invés de produzi-lo, mas também

produzindo novos compostos cimentícios resistentes, como o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H). Esta reação, apresentada na equação 2.1, é denominada de reação pozolânica.



onde:

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| $\text{CH}_{\text{Cimento Portland}}$ | <i>Hidróxido de Cálcio do cimento Portland</i> |
| H                                     | <i>Água</i>                                    |
| C-S-H                                 | <i>Silicato de Cálcio Hidratado</i>            |
| C-A-H                                 | <i>Aluminato de Cálcio Hidratado</i>           |

As partículas finamente divididas da pozolana residual (que não reage com os produtos de hidratação do cimento) e outros compostos formados durante a reação pozolânica, como os Cálcio Aluminato Hidratados (C-A-H), atuam apenas como filler, reduzindo a porosidade da estrutura resultante. A combinação dos efeitos pozolânico e filler decorrentes da reação pozolânica representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos.

Segundo Metha & Monteiro (1994), com respeito às interações físicas da pozolana na pasta de cimento resultantes da reação entre suas partículas e o hidróxido de cálcio (reação pozolânica) dois efeitos podem ser considerados: o refinamento do tamanho dos poros e o refinamento do tamanho do grão.

O primeiro se refere à formação de produtos de hidratação secundários (principalmente silicatos de cálcio hidratados) ao redor das partículas de pozolana, que tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso e, conseqüentemente, de baixa densidade. Do mesmo modo, no processo referido como refinamento do tamanho do grão, a nucleação do CH ao redor das partículas finas e bem distribuídas da pozolana, tem o efeito de substituir os cristais grandes e orientados desta fase por numerosos cristais pequenos e menos orientados, além

de produtos de reação pouco cristalinos. Ambos os processos contribuem para o aumento de resistência da pasta de cimento.

A aptidão dos materiais pozolânicos de reagirem com a cal, formando compostos de propriedades aglomerantes, reside no fato de o silício e o alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente. A princípio, quanto maiores forem o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico, mais intensamente se manifestará a reação pozolânica (FARIAS FILHO *et al.*, 2000).

Outro aspecto a ser considerado com relação à reação pozolânica é a forma mais lenta com que a mesma ocorre quando comparada ao cimento, resultando em uma taxa de liberação de calor e desenvolvimento de resistência conseqüentemente lentas (METHA & MONTEIRO, 1994). Segundo Farias Filho *et al.* (2000), a cinética desta reação dependerá, além das características mineralógicas da pozolana, de sua finura e da temperatura e concentração dos reagentes.

Metha & Aïtcin (1990) assim resumem as interações que ocorrem entre a pozolana e o cimento Portland: *“as pequenas partículas da pozolana, menos reativas do que o cimento Portland, quando dispersas na pasta de cimento, geram um grande número de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Além do mais, este mecanismo torna a pasta mais homogênea e densa com respeito à distribuição dos poros devido às reações pozolânicas que ocorrem entre a sílica amorfa da adição mineral e o hidróxido de cálcio pelas reações de hidratação do cimento. Em adição, o efeito físico dos grãos mais finos permite um empacotamento mais denso com o cimento e reduz os problemas na zona de transição entre a pasta e o agregado. Como resultado, esta zona mais fraca é reforçada devido a maior aderência entre essas duas fases, promovendo melhoras na microestrutura e nas propriedades do concreto de um modo geral”*.

### **2.2.2 Efeitos da Pozolana nas Propriedades de Engenharia**

Segundo Metha & Monteiro (1994), em concretos frescos que mostram uma tendência à exsudação e à segregação, a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume de vazios. Mas, embora todos aditivos minerais finamente moídos, como as pozolanas, tendam a melhorar a coesão e trabalhabilidade de concretos neste estado, o emprego de materiais de superfície específica muito elevada, tais como a microssílica e as cinzas das cascas de arroz, tende a aumentar o consumo de água para uma dada consistência. De acordo com os mesmos autores, com relação à temperatura de cura, enquanto exposições a temperaturas elevadas podem ser prejudiciais ao concreto de cimento Portland, o concreto contendo pozolana pode ser beneficiado pela ativação térmica através da aceleração da reação pozolânica.

Um importante fator que influencia a hidratação do cimento é a temperatura de cura (NEVILLE, 1997). Altas temperaturas de cura aumentam a resistência de concretos nas primeiras idades, inferiores a 7 dias, mas afetam contrariamente esta propriedade após esta idade, provocando uma redução de seus valores. Isto ocorre porque a rápida hidratação inicial do cimento causada pela alta temperatura, forma mais produtos porosos devido à indisponibilidade de tempo suficiente para a difusão dos produtos de hidratação do cimento, permanecendo uma grande parcela dos poros sem preenchimento. No caso de concretos contendo pozolanas, as partículas finamente divididas da pozolana permitem uma maior dispersão, facilitando o efeito filler (WILD *et al.*, 1995).

Em seus estudos sobre o efeito da temperatura de cura no desenvolvimento da resistência de concretos contendo cinzas volantes, Sabir & Wild (2000) observaram que o efeito benéfico da cura a uma temperatura elevada de 50°C foi restrito às primeiras idades dos mesmos. As reduções na resistência do concreto de cimento Portland submetido a este tipo de cura, também foram por eles confirmadas. Efeito semelhante ao ocorrido no cimento Portland contendo cinzas volantes foi observado para concretos contendo metacaulim.

Swamy (2000) afirma que sistemas contendo cimento + cinzas volantes / escória / materiais pozolânicos + aditivos químicos podem resultar em excelentes benefícios nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido. Dentre eles: melhora na trabalhabilidade, redução da segregação, aumento da resistência à fissuração térmica através da redução do calor de hidratação e significativa redução da permeabilidade.

Em seus estudos utilizando misturas de cimento/pozolana, contendo 50% em peso de substituição do cimento por escória de diferentes finuras, o referido autor observou os seguintes aspectos:

- redução dos picos do calor de hidratação e aumento dos tempos nos quais estes ocorreram para todas as misturas contendo adição quando comparadas às amostras de controle, sem substituição;
- o aumento da finura do escória provocou moderados aumentos nos tempos de pega das misturas;
- ensaios relacionados à avaliação da estrutura porosa das misturas, como a porosimetria por intrusão de mercúrio e a penetração de água sob pressão, mostraram que a incorporação de escória pode reduzir substancialmente a difusividade de agentes agressivos como o cloro e a penetração de água.

Ay e Ünal (2000) estudaram as propriedades pozolânicas de resíduos cerâmicos moídos e o tempo de pega, estabilidade volumétrica, tamanho de partículas, densidade e superfície específica de cimentos contendo estes resíduos em taxas de 25% a 40%. Com relação aos tempos de pega destes cimentos, os autores observaram que os valores relativos aos cimentos contendo 25% de resíduos foram muito próximos daqueles observados para os cimentos contendo, 30%, 35%, e 40% deste material de substituição. Seus resultados, porém, não foram expressos em comparação ao cimento Portland utilizado sem adição.

Turanli & Bektas (2005) observaram em seus estudos um aumento do fator água/cimento requerido com o aumento do teor adicionado de pozolana para

a obtenção da consistência normal em pastas de cimento contendo esta adição, concluindo que um aumento de 35% para 55% deste teor na mistura resultou em aproximadamente 14% de aumento na demanda de água para a referida consistência. No entanto, os autores não puderam explicar as diferenças observadas nos tempos de pega das misturas contendo pozolana, cujos resultados não ofereceram correlação alguma com a variação dos teores.

Oliveira (2004), utilizou um caulim calcinado a 700°C, em teores variando de 10% a 40%, como substituto parcial do cimento em argamassas, avaliando o efeito da variação de sua finura na resistência das mesmas. Os melhores resultados foram obtidos para a maior finura utilizada e indicaram um acréscimo de cerca de 25% de resistência em argamassas contendo 20% deste resíduo com relação às argamassas de referência (0% de resíduo).

Farias Filho *et al.* (2000) estudaram a resistência à compressão de argamassas contendo resíduo de tijolo queimado moído e metacaulinita como substitutos parciais do cimento Portland, observando o seu aumento para todas as porcentagens de substituição utilizadas. O acréscimo de resistência variou de 27% a 39% para o caso em que se utilizou o primeiro e de 21% a 72% para o segundo. Nas duas situações a resistência máxima foi obtida com um índice de substituição de 18%.

Toledo Filho *et al.* (2001) concluíram que as resistências à compressão de concretos confeccionados com resíduos cerâmicos em substituição parcial ao cimento foram superiores às dos concretos de referência para níveis de substituição de até 40%.

Segundo Gonçalves (2005), o desempenho de uma dada pozolana no concreto depende de fatores tais como a composição química, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, diâmetro médio, forma e massa específica do material pozolânico, além da proporção dos materiais, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregados, aditivos químicos, idade e grau de hidratação do concreto.



Segundo Babu & Rao (1993) *apud* Gonçalves (2005) a eficiência de uma determinada pozolana é geralmente avaliada em função da resistência à compressão axial, tendo a mistura de controle como referência.

O perfil de distribuição da resistência à compressão axial em função da relação água/cimento é caracteristicamente reconhecido por seguir uma tendência exponencial de acordo com a curva de Abrams, através da equação 2.2 (METHA & MONTEIRO, 1994).

$$f_c = K_1 K_2^{a/c} \quad (2.2),$$

onde:

$f_c$  Resistência à compressão (MPa);

$K_1$  e  $K_2$  Constantes experimentais que dependem do cimento;

$a/c$  Relação água/cimento.

Durante a reação pozolânica cada massa unitária de cimento libera, durante sua hidratação, uma certa massa de cal livre que por sua vez pode ser convertida em uma quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional quando combinado com a sílica disponível na pozolana e com a água. Desta forma, o material aglomerante, cimento + pozolana pode ser definido como um cimento equivalente (Ceq) determinado segundo as equações 2.3 e 2.4 (GONÇALVES, 2005; DE LARRARD, 1999 *apud* GONÇALVES, 2005).

$$Ceq = c \left[ 1 + 1.1 \left[ 1 - \exp \left( - Ip \frac{pz}{c} \right) \right] \right] \quad (2.3)$$

$$Ip = -3. \ln \left[ 1.91 - \frac{2,2}{(IAP_{28}.0,0522)^{0,351} - 1} \right] \quad (2.4)$$

onde:

|            |   |
|------------|---|
| $C_{eq}$   | cimento equivalente                                     |
| $c$        | quantidade de cimento na mistura                        |
| $p_z$      | quantidade de pozolana                                  |
| $IAP_{28}$ | Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias. |

A variação de  $C_{eq}$  das misturas contendo pozolanas reflete na relação água/ $C_{eq}$ . Como existe uma relação bem estabelecida entre a relação água/cimento e a resistência à compressão axial para argamassas e concretos, conforme estabelecido pela equação 2.2, a variação na relação água/ $C_{eq}$  refletirá na resistência à compressão das misturas que contenham estas pozolanas.

Deste modo, o conceito de cimento equivalente leva em consideração que a utilização de um material pozolânico em substituição do cimento pode contribuir ou não para o ganho de resistência à compressão através da reação pozolânica, visto que, se a pozolana utilizada possuir elevada atividade, a mesma produzirá uma quantidade de hidratos maior do que a quantidade de cimento substituído produziria, ocasionando, desta forma, um incremento na resistência, ocorrendo efeito inverso para pozolanas de baixa atividade.

### 2.2.3 Durabilidade de Concretos Contendo Pozolana

Comparado ao cimento Portland comum, a superior durabilidade de um cimento contendo pozolana aos sulfatos e aos ambientes ácidos é devido ao efeito combinado da menor permeabilidade para uma dada relação água/cimento, grau de hidratação e redução do conteúdo de hidróxido de cálcio na pasta de cimento (METHA & MONTEIRO, 1994).

De acordo com Metha & Monteiro (1994), em determinada pesquisa envolvendo misturas de cimento/pozolana, observou-se que, em comparação a pastas contendo apenas cimento Portland como material aglomerante, a

profundidade de penetração da água foi reduzida em aproximadamente 50% em pastas de cimento, com idade de um ano, contendo 30% de uma pozolana grega. Enfatizam ainda que, do ponto de vista da impermeabilidade e durabilidade, os efeitos da reação pozolânica são provavelmente mais importantes no concreto do que na pasta endurecida de cimento, visto que é sugerido que os processos de refinamento do tamanho do poro e do tamanho do grão, discutidos anteriormente no subitem 2.2.1, aumentam a resistência da zona de transição, reduzindo assim a microfissuração e permeabilidade do concreto.

Segundo Isaia *et al.* (2000) as pozolanas desempenham um importante papel quando adicionadas ao cimento Portland haja vista que, geralmente, elas aumentam a resistência mecânica e a durabilidade das estruturas de concreto. O mais importante efeito na microestrutura da pasta cimentícia são as mudanças na sua estrutura porosa produzidas pela redução dos tamanhos dos grãos, ocasionada pelas reações pozolânicas (efeito pozolânico), e a obstrução dos poros e vazios pela ação dos grãos finamente divididos (efeito filler).

Embora a durabilidade de concretos, de uma forma geral, seja tema de inúmeros trabalhos de pesquisa em todo o mundo, não se observa entre eles a adoção de uma metodologia comum que sirva como modelo para a avaliação desta característica tão importante. No entanto, entidades como o RILEM (sigla francesa para Reunião Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas Construtivos e Estruturas) tem voltado suas atenções para o referido tema e reunido esforços na tentativa de elaborar e consolidar uma normatização relativa à avaliação da durabilidade dos concretos.

Segundo Ferreira e Jalali (2000) para assegurar adequadamente a durabilidade do concreto, outras propriedades além da resistência à compressão devem ser avaliadas. Uma vez que a interação entre a camada superficial do concreto e o meio externo é essencial para a iniciação de vários processos de degradação, uma avaliação das propriedades de transporte desta camada superficial deve promover fortes indicações da durabilidade de um dado concreto. Este fato pode explicar o porque da maioria dos testes utilizados para avaliar a

durabilidade de concretos ser baseado na medida de alguma forma de propriedade de transporte destes materiais. Em seus estudos relacionados à avaliação da durabilidade dos concretos, os referidos autores avaliaram quatro testes comumente utilizados este propósito: resistência à compressão axial, resistividade elétrica, permeabilidade de oxigênio e penetração de cloretos, buscando analisar uma possível correlação entre os resultados dos mesmos. Os resultados obtidos sugerem que os testes de resistividade elétrica podem promover resultados confiáveis os quais se correlacionam bem com os resultados dos demais testes. Entretanto, os autores ressaltam que, embora o teste de resistividade elétrica seja capaz de distinguir diferentes qualidades de concreto, este não é suficiente para identificar mudanças na qualidade de um mesmo concreto ao longo de seu período de cura.

É importante salientar que, tendo em vista a enorme influência do teor de umidade das amostras ensaiadas nos resultados dos ensaios de resistividade elétrica, estes ensaios devem ser conduzidos sob condições de umidade bem controladas, de maneira a fornecerem resultados confiáveis.

De acordo com Sato (1998), o desempenho do concreto, enquanto barreira para a diminuição do transporte de agentes potencialmente causadores de corrosão das armaduras, está relacionado com a sua permeabilidade. Assim, modifica-la pode ser uma solução econômica eficiente e simples para aumentar a durabilidade do concreto armado. Em seus estudos referentes à porosidade de concretos com e sem escória a autora efetuou as seguintes observações acerca dos primeiros em relação aos segundos: volume total de poros maior, porém com maior frequência de ocorrência de poros menores, e maior carbonatação, explicada pela menor reserva alcalina dos concretos com adição. Os concretos analisados tinham idade superior a 240 dias.

No geral observa-se que, embora o seu uso pareça ser compreensivelmente favorável, o efeito das pozolanas, especialmente os resíduos cerâmicos moídos, na performance de concretos, em especial com relação a sua

microestrutura e propriedades relativas a sua durabilidade em idades avançadas, ainda não é inteiramente compreendido.

### **2.3 Corrosão**

O termo corrosão pode ser definido como a reação de um metal com os elementos do seu meio, na qual o metal é convertido a um estado não metálico. Quando isto ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade, e o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos destas propriedades (RAMANATHAN).

De acordo com Cascudo (1997), segundo a natureza do processo a corrosão pode ser classificada em química e eletroquímica. A primeira, também conhecida como corrosão seca ou simplesmente oxidação, é um processo lento e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto quando se tratar de gases extremamente agressivos. Já a corrosão eletroquímica ou aquosa é a que efetivamente traz problemas às obras civis.

Sendo a corrosão em meio aquoso, esta dá origem a íons em dissolução, os quais podem participar em reações de equilíbrio com outros íons do meio, incluídos os da água. Deste modo, uma vez que a reação de corrosão depende de uma série de reações nas quais intervêm, direta ou indiretamente, os íons da água, esta depende conseqüentemente do pH do meio (ANDRADE, 1992).

Como o potencial do processo de corrosão depende destes equilíbrios, pode-se estabelecer uma relação em função do pH, representada graficamente em um diagrama potencial versus pH, mundialmente conhecido como diagrama de Pourbaix. Este diagrama estabelece para cada metal a condições de pH e potencial nas quais o material se corrói, se passiva ou permanece imune. A Figura 2.3 apresenta o diagrama de Pourbaix para o Fe a 25°C. O estado definido como de passividade pressupõe que o metal se encontra coberto por um capa de óxidos,

transparente, imperceptível e que atua como barreira, impedindo a oxidação posterior. Ao contrário, o estado de imunidade supõe que o metal não se corrói a não ser que se dêem as condições termodinâmicas favoráveis para que isto aconteça. É o estado em que se situam os metais submetidos à proteção catódica (ANDRADE, 1992).

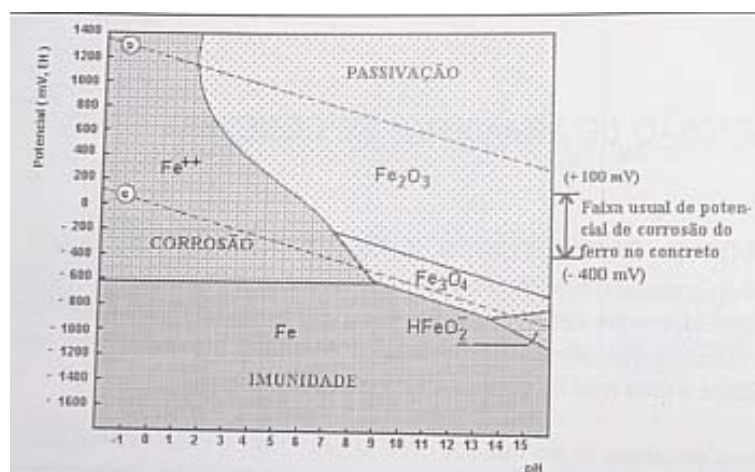


Figura 2.3: Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade (CASCUDO, 1997).

### 2.3.1 Mecanismos da Corrosão no Concreto

A corrosão de armaduras em concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica consideravelmente mais altas do que a dos eletrólitos típicos (não confinados a uma rede de poros, como é o caso do concreto) (CASCUDO, 1997).

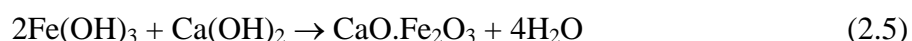
A durabilidade das estruturas de concreto armado é então o resultado natural da dupla natureza que o concreto exerce sobre o aço: por uma parte, o cobrimento do concreto é uma barreira física, e por outra, a elevada alcalinidade do concreto (pH em torno de 12,5) desenvolve sobre o aço uma camada passiva

que o mantém inalterado por um tempo que não se pode determinar (ANDRADE, 1992).

A alcalinidade do concreto provém da fase líquida constituinte dos de seus poros, a qual, nas primeiras idades, é basicamente uma solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Em idades avançadas o concreto continua, via de regra, propiciando um meio alcalino, sendo que sua fase líquida, nesse caso, é uma solução composta principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) originários dos álcalis do cimento.

Dessa forma, a armadura presente no interior do concreto, em meio alcalino, está protegida do fenômeno de corrosão devido à presença de uma película protetora de caráter passivo composta por óxido de ferro; este é formado rapidamente a partir das reações de oxidação do ferro e de redução do oxigênio inicialmente presente na fase líquida dos poros do concreto (CASCUDO, 1997).

Helene (1986) ressalta que a camada passiva pode ser resultante da ferrugem superficial ( $\text{Fe(OH)}_3$ ) com o hidróxido de cálcio, formando o ferrato de cálcio, segundo a reação 2.5.



Além da passivação do aço, Rosenberg *et al.* (*apud* CASCUDO, 1997) ainda destacam no concreto um aspecto físico adicional de proteção contra a corrosão, que seria a formação de um precipitado de plaquetas hexagonais de  $\text{Ca(OH)}_2$  sobre a superfície metálica, constituindo assim uma camada de proteção física para as barras.

Do exposto, observa-se que a camada passiva é a grande defesa da armadura. Entretanto, ela pode ser perdida, descaracterizando-se, frente a duas condições básicas (fatores desencadeantes):

- presença de uma quantidade suficiente de íons cloreto, advindos tanto do meio externo, através da difusão, quanto da água de amassamento e/ou a agregados contaminados, ou ainda da utilização de determinados tipos de aditivos químicos;
- diminuição da alcalinidade do concreto, devido às reações de carbonatação do concreto, à penetração de substâncias ácidas em seu interior ou à lixiviação da solução alcalina intersticial do concreto.

Uma vez despassivada, a armadura fica vulnerável à corrosão, ocorrendo então a chamada propagação do fenômeno de corrosão, desde que hajam os elementos básicos para tanto: eletrólito, diferença de potencial e oxigênio, podendo ainda existirem agentes agressivos. Dentre os fatores que fixam a cinética do processo de corrosão das armaduras de concreto (fatores acelerantes) pode-se citar:

- teor de umidade ou oferta de eletrólito que por sua vez fixa a disponibilidade de oxigênio nas proximidades da armadura e a resistividade do concreto;
- teor de cloretos;
- temperatura;

O teor de umidade é o fator que mais influencia a velocidade da corrosão. As velocidades de corrosão máxima só se dão em concretos com teores de umidade altos, porém sem saturar os poros. Neste caso o oxigênio chega livremente a armadura e a resistividade é suficientemente baixa para permitir elevadas velocidades de corrosão.

É importante salientar que a umidade, o oxigênio e a temperatura podem ter efeitos opostos. Por exemplo, um maior umidade facilita a corrosão, mas impede o acesso de oxigênio, ou um incremento de temperatura acelera a corrosão, mas diminui a condensação. Este efeito “inverso” pode dar lugar a interpretações errôneas.

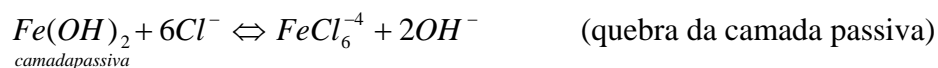


A situação mais agressiva efetivamente e a responsável pelo maior número de casos de corrosão de armaduras é a presença de cloretos, haja vista que os íons cloreto têm a propriedade de destruir de forma pontual a camada passivante, ocasionando o que se denomina de corrosão por pites.

Em suma, pode-se afirmar que, na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica. A absorção se dá numa camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem e secagem do revestimento pela ação das intempéries; mais para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, tem-se basicamente a difusão.

O mecanismo de difusão é relativamente lento e em geral os cloretos e outros sais podem penetrar muito mais rapidamente pelo mecanismo de transporte por forças capilares.

A ação deletéria dos cloretos vai desde a despassivação da armadura até a participação plena no processo corrosivo; a saber, eles aumentam substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo, além de participarem como catalisadores em reações para a formação dos produtos de corrosão como pode ser visto, por exemplo, nas equações abaixo:



### **2.3.2 O Papel das Adições Pozolânicas no Processo de Corrosão em Concretos**

Algumas características e propriedades do concreto estão diretamente ligadas à corrosão dentre as quais considera-se como mais importantes a camada de recobrimento da armadura, o tipo de aço utilizado, a presença de fissuras, a relação água/cimento, a estrutura porosa e a resistividade elétrica do concreto, bem como o tipo de cimento e adições utilizados.

Problemas de uniformidade e espessura da camada de cobrimento podem facilitar o início ou acelerar processos de corrosão já existentes. Já a relação água/cimento é um dos parâmetros mais importantes em todo o contexto da corrosão, haja vista que ela determina a qualidade do concreto, uma vez que define as características de compactidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida e, conseqüentemente, a sua permeabilidade e absorção. A resistividade elétrica, por sua vez, é um parâmetro que depende da umidade, permeabilidade e grau de ionização do eletrólito do concreto sendo, pois, um dos fatores controladores da função eletroquímica.

No escopo deste trabalho, os possíveis efeitos relativos à corrosão de armaduras ocasionados pela introdução de adições pozolânicas no concreto merecem destaque.

Segundo Cascudo (1997), em geral, concretos com adições de escórias ou de materiais pozolânicos tais como cinza volante ou sílica ativa, apresentam estruturas de pasta mais compactas e, portanto, os desempenhos destes concretos quanto à penetração de gases, líquidos e íons são consideravelmente melhores se comparados aos concretos de cimento Portland comum. Isto significa importantes benefícios quanto à ação deletéria dos cloretos. Em contrapartida, parece ser uma realidade o fato de que tais adições em geral pioram o comportamento destes concretos em relação à carbonatação.

Isaia (1995, *apud* CASCUDO 1997), estudando os efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de alto desempenho, constatou que os melhores resultados obtidos com vistas à durabilidade quanto à corrosão de armaduras foram obtidos com cinza volante em mistura ternária com cinza de casca de arroz na proporção de 20% e 30%, respectivamente.

Gonçalves (2005) estudou o efeito da substituição parcial do cimento Portland por metacaulinita e resíduo cerâmico na durabilidade de concretos através dos seguintes parâmetros: absorvidade, porosidade total por imersão total em água e porosimetria por intrusão de mercúrio, resistência à penetração acelerada de íons cloreto e ao ataque por sulfato. Com relação à utilização do resíduo cerâmico em substituição ao cimento o referido autor concluiu que teores de 20% produziram concretos com uma estrutura de poros mais refinada, com uma maior resistência à penetração de água e íons cloreto, tendo sido esta última reduzida cerca de cinco vezes em relação ao concreto de referência. A metacaulinita teve desempenho semelhante para teores de substituição de 10%, mas a redução da penetração de íons cloro foi de aproximadamente 14%.

É importante salientar que, conforme discutido anteriormente, a alta alcalinidade do concreto, capaz de favorecer a passivação das armaduras nele embutidas, é devida nas primeiras idades à presença do hidróxido de cálcio (CH) oriundo das reações de hidratação do cimento e em idades mais avançadas aos hidróxidos de sódio e potássio provenientes dos álcalis dos cimentos. Deste modo, o pH das soluções intersticiais de concretos contendo pozolanas em substituição ao cimento Portland pode ser reduzido em consequência não apenas da reação pozolânica, que consome o CH, mas também devido à maior diluição do cimento, que reduz a oferta dos compostos provenientes dos seus álcalis.

De acordo com Torres (2004) a variação do pH com o tempo tende a seguir aos estados de equilíbrio iônico, conforme apresentado na Tabela 2.2 e Figura 2.4.

Tabela 2.2: Equações Químicas no equilíbrio e seus respectivos pHs (Torres, 2004).

| Legenda | Equilíbrio químico   | pH no equilíbrio |
|---------|--|------------------|
| A       | $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} (0.1\text{M})$  | 12,90            |
| B       | $\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$   | 12,44            |
| C       | $2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{1-} + \text{OH}^-$ | 10,33            |
| D       | $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^{1-} + \text{OH}^-$                      | 8,48             |

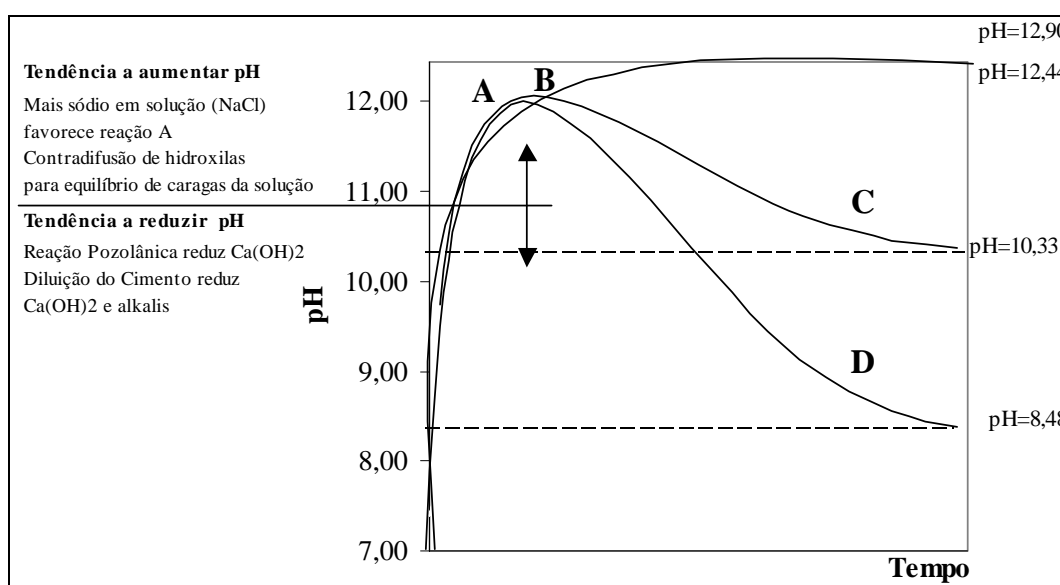


Figura 2.4: Variação esquemática do pH em soluções e os equilíbrios iônicos das reações da tabela 4.15.

Os equilíbrios A e B (Figura 2.4), provocados pela lixiviação do hidróxido de cálcio (CH) e dos álcalis do cimento, forçam o pH das soluções para valores em torno de 12,50. É possível notar que, tanto a diluição do cimento, quanto a reação pozolânica, devido ao aumento da substituição do cimento por material pozolânico, interferem na cinética deste aumento de pH provocado pelo equilíbrio A e B, pois ambas reduzem a oferta de CH.

O pH de equilíbrio será então dependente da reação predominante no sistema, a qual, por sua vez, ocorrerá de acordo com a disponibilidade dos compostos e elementos necessários para esse fim.

A Figura 2.5 apresenta um esquema representativo das possíveis equações de equilíbrio do pH de uma solução de água e cloreto de sódio na qual se encontra imersa uma amostra de concreto contendo material pozolânico e a suposta variação entre pH desta solução e o pH da solução intersticial do concreto submerso.

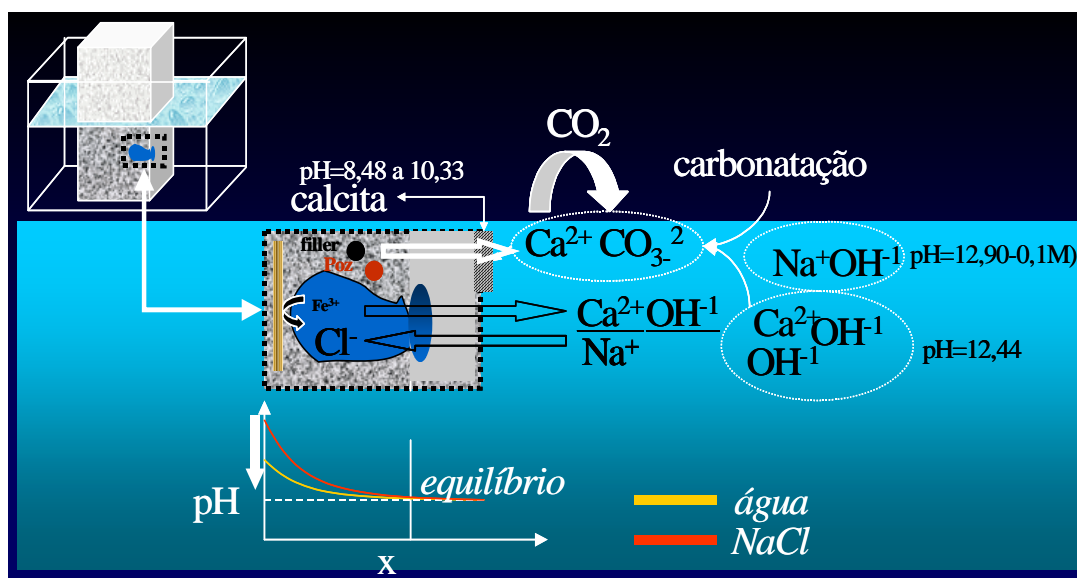


Figura 2.5: Equações de equilíbrio do pH de uma solução salina na qual se encontra imersa uma amostra de concreto contendo material pozolânico.

De acordo com a Figura 2.5, após a imersão da amostra de concreto na solução salina inicia-se o processo de lixiviação do Hidróxido de Cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que, de acordo com a equação B da Tabela 2.2, tende a elevar o pH para valores em torno de 12,44. Porém, com a difusão dos íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) para o interior do concreto, ocorre uma maior lixiviação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , particularmente de hidroxilas (H) (contradifusão para equilíbrio da solução), ocasionada pelo incremento da concentração de íons sódio ( $\text{Na}^+$ ) em solução, que difunde muito pouco em cimento. Deste modo, o excesso de  $\text{Na}^+$  oriundo da dissolução do  $\text{NaCl}$  tende a se equilibrar com as hidroxilas lixiviadas, aumentando o pH da solução para valores em torno de 12,9. Este efeito poderá ser mais ou menos intenso dependendo da disponibilidade de hidróxido de cálcio (menor com a diluição do cimento e com a reação pozolânica) e da formação de compostos contendo cloro, tais como os sais de Friedel (TORRES, 2004).

Em presença de  $\text{CO}_2$  ocorre a carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$  e, ao longo do tempo, observa-se uma tendência à redução do pH, caminhando para o equilíbrio dos carbonatos, em torno de 8,48 e 10,33, dependendo, respectivamente da disponibilidade ou não de  $\text{CO}_2$  atmosférico, em dissolução na solução. Caso essa concentração de  $\text{CO}_2$  seja reduzida com o tempo, o pH tende a se estabilizar em torno de 10,33, caso não haja mais  $\text{CO}_2$  para ser dissolvido neste meio. Caso a fonte de  $\text{CO}_2$  seja de natureza infinita, uma vez que ocorra a disponibilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido em solução, o pH da mesma tenderá a se estabilizar em torno de 10,33.

As fontes de carbonato atuantes na variação do pH de soluções desta natureza podem ser não apenas aquelas oriundas das reações entre o  $\text{CO}_2$  atmosférico e o  $\text{Ca(OH)}_2$  lixiviado, mas também provenientes do cimento e da pozolana utilizados, cujas composições podem ou não conter carbonatos.

### **2.3.3 Avaliação do Processo de Corrosão em Concretos**

A avaliação propriamente dita da corrosão de armaduras deve, preferencialmente, ser feita mediante o emprego de técnicas eletroquímicas, haja vista a natureza do fenômeno corrosivo. Neste sentido, as técnicas de potenciais de corrosão e de resistência de polarização são muito adequadas para avaliarem quadros corrosivos em estruturas de concreto, notadamente pela importância das informações obtidas e pela praticidade envolvida em suas aplicações. (CASCUDO, 1997).

#### Potencial de Eletrodo

O potencial de eletrodo é uma diferença de potencial que ocorre entre um determinado metal e um meio aquoso. No concreto, o potencial de eletrodo (também denominado de potencial eletroquímico ou potencial de corrosão) é uma medida da maior ou menor facilidade de transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto e que, portanto, é uma propriedade da

interface aço-concreto e não apenas do aço. Trata-se de uma grandeza que indica aproximadamente a situação de corrosão ou passividade das armaduras imersas no concreto. Fornece informações meramente qualitativas, não fornecendo informações quantitativas. Deste modo, não é possível extrair dos resultados deste método informações sobre a velocidade de corrosão real da armadura (CASCUDO, 1997; ANDRADE, 1992).

A medida do potencial de eletrodo consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras de corpos-de-prova ou de estruturas de concreto e um eletrodo de referência colocado em contato com a superfície do concreto. A rigor o que se tem é uma diferença de potencial verificada entre duas semicélulas: a semicélula aço/concreto (eletrólito) e a semicélula estável que é o eletrodo de referência, o qual exerce o papel de detectar a presença das linhas de corrente que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão nas armaduras. Nos locais onde passam essas linhas de corrente os potenciais registrados tendem a ser mais eletronegativos do que nos locais passivados, sem corrosão. Esses locais com característica de maior eletronegatividade indicam, portanto, a presença de zonas ativas de corrosão nas barras.

A Figura 2.6 apresenta o esquema de um dispositivo convencional para a medida dos potenciais de corrosão. A adoção de um eletrodo particular de referência é equivalente à eleição arbitrária de um ponto de origem na escala de potenciais. Os mais utilizados são os de calomelano saturado – ECS e o de cobre/sulfato de cobre – ESC.

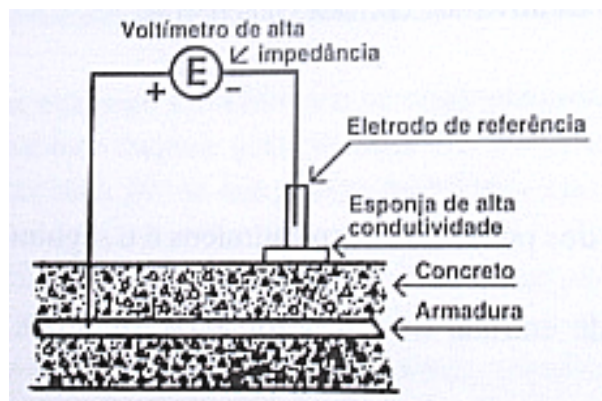


Figura 2.6: Esquema de um dispositivo convencional para medição dos potenciais de corrosão (CASCUDO, 1997).

Os valores de potencial podem ser associados à probabilidade de corrosão segundo os critérios propostos pela ASTM C-876, de acordo com os estudos de Van Daveer, conforme a Tabela 2.3. Estes critérios de avaliação tomam como referência o concreto úmido, porém não saturado completamente (CASCUDO, 1997).

Tabela 2.3: Avaliação dos resultados obtidos mediante a técnica de medidas de potenciais de eletrodo, em estruturas de concreto armado, segundo a ASTM C-876.

| Potencial de Corrosão Relativo ao Eletrodo de Referência de Cobre/Sulfato de Cobre – ESC (mV) | Probabilidade de Corrosão (%) |
|---|-------------------------------|
| mais negativo que -350  | 95                            |
| mais positivo que -200  | 5                             |
| de -200 a -350  | incerta                       |

Segundo Cascudo (1997) as principais circunstâncias que influenciam nas medidas de potencial e que, portanto, podem conduzir a conclusões errôneas, são: o teor de umidade e qualidade do concreto, a profundidade e a resistividade da camada de cobrimento, a presença de frentes de carbonatação e cloretos, além das correntes de fuga.



De acordo com o teor de umidade que se encontre o concreto, se seco ou úmido, uma mesma medida de potencial pode variar de uns poucos milivolts chegando até 100-200mV (o concreto úmido sempre dá lugar a potenciais mais negativos). Com relação à qualidade do concreto, é sabido que os potenciais medidos na superfície do concreto são menos negativos do que o potencial verdadeiro, imediatamente adjacente à armadura corroendo. Deste modo, o erro acarretado na medida será tanto mais acentuado quanto mais alta for a qualidade do concreto.

A identificação de pequenas áreas com corrosão torna-se cada vez mais difícil com o aumento da camada de cobrimento. A resistividade desta camada, quando elevada, pode afetar as medidas de potencial haja vista que a corrente de corrosão (iônica) tende a evitar o concreto resistivo, implicando no eletrodo de referência não detectá-la, acarretando a não identificação de áreas que estejam efetivamente sendo corroídas.

O efeito da carbonatação é o de produzir leituras de potencial com valores menos negativos do que os esperados. Com os cloretos tem-se uma situação inversa à da carbonatação. Quando eles penetram no concreto, oriundos do meio externo uma distorção no potencial pode ser verificada devido à concentração variada destes cloretos no eletrólito presente nos poros deste concreto. Assim, como a solução de maior concentração está mais próxima da superfície, isto tende a tornar os potenciais mais negativos do que os seus valores reais. Em ambos os casos, a distorção máxima considerada teoricamente é de cerca de 100mV.

### Resistência de Polarização

A resistência de polarização ( $R_p$ ) representa a inércia que um sistema possui de desenvolver um processo eletroquímico de corrosão. Sendo assim, quanto maior for a  $R_p$ , menos intensas serão as velocidades de corrosão encontradas (CASCUDO, 1997).

A presente técnica utiliza o estímulo de uma corrente contínua aplicada à armadura, exercendo uma polarização ao redor do potencial de corrosão livre, o qual, até a aplicação desta pequena polarização, encontra-se no seu estado estacionário de corrosão (todos os elétrons liberados nas reações anódicas são consumidos nas reações catódicas).

Uma vez medido o potencial de corrosão e aplicada a pequena polarização em torno do mesmo, registra-se o incremento de corrente resultante desta polarização. Desta forma, o valor de  $R_p$  é definido como quociente entre os incrementos de potencial e corrente.

Finalmente, após a determinação experimental de  $R_p$ , utiliza-se a equação de Stern-Geary (equação 2.6), para a determinação da corrente de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ). Na referida equação  $B$  é a constante de Stern-Geary, dependente das contribuições das reações anódicas e catódicas, que pode ser obtida experimentalmente, ou retirada da literatura para o sistema em questão.

$$I_{corr} \equiv \frac{B}{R_p} \quad (2.6)$$

A taxa ou velocidade de corrosão do sistema é dada pelo quociente entre a corrente de corrosão e a área anódica do aço. Pela ordem de grandeza da taxa de corrosão obtida, pode-se inclusive concluir sobre o estado da armadura, se passivada ou não.

Deste modo, a técnica de resistência de polarização constitui-se num elemento essencial para análises mais consistentes de estruturas de concreto

armado que supostamente estejam desenvolvendo um processo de corrosão, haja vista que a mesma é capaz de avaliar não somente o estado de passivação da armadura, e a dinâmica do processo, dada pela velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997).

Para a obtenção da  $R_p$ , basicamente, são empregados: um potenciostato, que é o equipamento que polariza o aço em análise; um eletrodo de referência, que mede o potencial livre de corrosão, em torno do qual se exerce a polarização; um eletrodo de trabalho, que se constitui na própria armadura, e é o eletrodo efetivamente polarizado; e, finalmente, um contra-eletrodo, que fecha o circuito, permitindo a circulação da corrente oriunda do potencial aplicado. A Figura 2.7 mostra um dispositivo de três eletrodos para medir  $R_p$ , aplicado para estudos em laboratório, em corpos-de-prova de concreto armado.

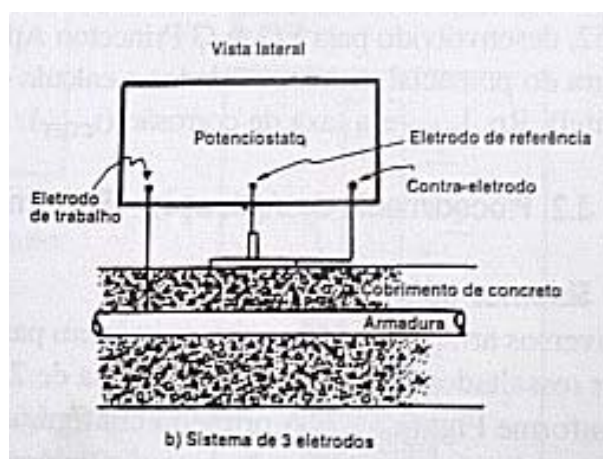


Figura 2.7: Sistema para medidas de resistência de polarização (CASCUDO, 1997)

Embora não hajam ainda critérios muitos definidos para relacionar a taxa de corrosão com o grau de deterioração e a importância do ataque, Alonso & Andrade, citados por Cascudo (1997), propõem os critérios constantes na Tabela 2.4 para se avaliar a corrosão segundo os dados obtidos pela técnica de resistência de polarização.

Tabela 2.4: Critérios de Avaliação da Velocidade de Corrosão

| Grau de Corrosão                  | Taxa de Corrosão          |                          |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                                   | $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ | $\mu\text{m}/\text{ANO}$ |
| desprezível                       | 0,1 a 0,2                 | 1,1 a 1,2                |
| início de corrosão ativa          | >0,2                      | >2,2                     |
| ataque importante mais não severo | ~1,0                      | ~11,0                    |
| ataque muito importante           | >10,0                     | >110,0                   |

## 2.4 Cominuição

A cominuição agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir a granulometria de um mineral/minério por ação mecânica, de determinado tamanho em elementos de tamanho menor. Esta operação de fragmentação envolve vários estágios aplicados ao minério desde o desmonte até o processo industrial subsequente, sendo os estágios de britagem e de moagem considerados os de maior magnitude. A britagem é a operação que fragmenta o material obtido no desmonte, podendo ser repetida várias vezes até se obter um material adequado à alimentação da moagem. Esta última se caracteriza pela operação de fragmentação dos finos. Neste estágio as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, ao tamanho adequado às necessidades de utilização do material moído (PEREIRA, 2000).

### 2.4.1 Moagem em Moinho de Bolas

A dureza das matérias-primas a moer é um fator importante na seleção do equipamento a ser utilizado para a realização da moagem. Em se tratando de materiais cerâmicos, cuja matéria-prima básica é argila, o processo de moagem utilizando moinhos de bolas é largamente utilizado. O referido processo permite obter uma distribuição granulométrica bastante fina e pode ser realizado a úmido ou a seco.

O moinho de bolas é constituído de uma carcaça de ferro, revestida internamente com blocos de sílex e carregado de corpos moedores (Figura 2.8). Dentre as principais variáveis que influenciam na moagem com este tipo de equipamento podemos citar o material utilizado como revestimento e bolas, tamanho e carga das bolas, quantidade e umidade dos produtos a moer, velocidade do moinho e tempo de moagem (PEREIRA, 2000).



**Figura 2.8: Moinho de Bolas Modelo SONE X I-4205 da CONTECO**

A distribuição granulométrica da carga moedora do moinho de bolas deve se dar em diferentes diâmetros visando a obtenção de um maior rendimento da moagem, haja vista que as esferas de maior diâmetro atuarão preferencialmente na ruptura do material, enquanto que as de menor diâmetro serão mais eficientes na obtenção de partículas menores (BISTROT, 1996).

Em geral, o carregamento inicial do moinho é composto por três diâmetros diferentes de bolas. O volume aparente ocupado pelas bolas deverá ser cerca de 55% do volume útil do moinho, devendo-se levar em conta que apenas 60% deste volume, aproximadamente, estará ocupado por bolas, sendo o restante caracterizado pelos espaços vazios existentes entre elas (BISTROT, 1996).

Com relação à quantidade de produtos a moer não existe uma regra única sobre a quantidade ótima e sim considerações gerais. O material a moer deve ser tal que a massa formada cubra ligeiramente as bolas. Quantidades

menores deixarão as bolas fora da massa, sofrendo, desta forma, um desgaste desnecessário. Já o excesso de material retardará demasiadamente o tempo de moagem. Recomenda-se que o conteúdo máximo da carga moedora juntamente com o do material a moer seja tal que deixe livre cerca de 25% do volume útil do moinho (PEREIRA, 2000).

Tempos de moagem excessivamente grandes não correspondem, necessariamente, a uma melhor moagem, ou seja, não correspondem à obtenção de menores tamanhos de grânulos. Deste modo, haverá um tempo de moagem adequado para cada material e moinho. Ultrapassando-se este tempo estar-se-á apenas elevando-se o custo do processo e o desgaste do moinho sem, no entanto, obter-se uma moagem mais fina (BISTROT, 1996).

## *Capítulo 3 – Material e Métodos*

---

A revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, revelou os seguintes aspectos acerca dos estudos envolvendo a utilização dos resíduos de cerâmica vermelha moídos como substitutos parciais do cimento Portland em argamassas e concretos:

- (i) grande concentração de pesquisas sobre a performance mecânica destes novos materiais;
- (ii) variabilidade dos resultados apresentados em função das características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais analisados;
- (iii) escassez de estudos relativos a durabilidade de argamassas e concretos contendo este tipo de resíduo;
- (iv) ausência de estudos envolvendo a otimização do beneficiamento do resíduo no tocante à relação entre a energia de cominuição e o potencial pozolânico.

Deste modo, os objetivos específicos deste trabalho visam elucidar algumas das principais questões passíveis de uma investigação mais aprofundada segundo a referida revisão. Estes objetivos encontram-se apresentados na Tabela 3.1, juntamente com os ensaios tecnológicos relacionados a cada um deles, os quais basearam-se nos parâmetros considerados relevantes para que os referidos objetivos fossem atingidos.

Tabela 3.1: Ensaio realizados em função dos objetivos específicos.

| Objetivo   | Ensaio   |
|--|--|
| Beneficiamento e caracterização dos resíduos de cerâmica vermelha  | - Massa Específica                               |
|  | - Finura Blaine                                  |
|  | - Análise Química                                |
|  | - Análise de Difração de Raios-X                 |
|  | - Índice de Atividade Pozolânica com Cal         |
| Avaliação das propriedades pozolânicas dos resíduos de cerâmica vermelha moídos e de sua variação com a finura destes resíduos                                     | - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento     |
|  |  |
| Estudar o efeito do teor de substituição e da finura nas propriedades no estado fresco e endurecido de pastas, argamassas e concretos contendo estes resíduos      | - Início e Fim de Pega das Pastas                |
|  | - Consistência das Argamassas                    |
|  | - Slump dos Concretos                            |
|  | - Resistência à Compressão Simples dos Concretos |
| Estudar o efeito do teor de substituição do cimento pelo resíduo e da temperatura de cura na estrutura porosa de argamassas e concretos                            | - Absorção por Imersão e Fervura                 |
|  | - Absorção por Capilaridade                      |
| Estudar o efeito do teor de substituição do cimento pelo resíduo em parâmetros relacionados à corrosão das armaduras de concretos submetidos ao ataque de cloretos | - Avaliação do pH da Solução de Imersão          |
|  | - Potencial de Corrosão                          |
|  | - Resistência de Polarização                     |



### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento composto com filler calcário, CPIIF-32, da marca Poty, disponível comercialmente no mercado local. No laboratório, o mesmo foi acondicionado em sacos plásticos devidamente lacrados visando a manutenção das suas propriedades até o momento de sua utilização.

A justificativa para a escolha deste tipo de cimento reside no fato do mesmo ser o único cimento composto encontrado em João Pessoa, cuja composição não apresenta outra adição pozolânica.

Sua caracterização físico-química foi fornecida pelo fabricante e encontra-se apresentada nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

**Tabela 3.2: Caracterização Química do Cimento CPIIF-32 POTY.**

|                                    | %     |
|------------------------------------|-------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 19,0  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2,60  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 5,00  |
| <b>CaO</b>                         | 63,29 |
| <b>MgO</b>                         | 2,50  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,16  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 1,18  |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 2,48  |
| <b>Na<sub>2</sub>Oeq.</b>          | 0,94  |
| <b>CaO livre</b>                   | 1,11  |
| <b>RI (Resíduo Insolúvel)</b>      | 1,05  |
| <b>Perda ao Fogo</b>               | 4,92  |

Tabela 3.3: Caracterização Física do Cimento CPIIF-32 POTY.

|   |                         |
|---|-------------------------|
| <b>Área Específica (Blaine)</b>                   | 4050 cm <sup>2</sup> /g |
| <b>Massa Específica</b>                           | 3,01 g/cm <sup>3</sup>  |
| <b>Densidade Aparente</b>                         | 1,10 g/cm <sup>3</sup>  |
| <b>Finura – Resíduo na Peneira 0,075mm (#200)</b> | 1,70 %                  |
| <b>Finura – Resíduo na Peneira 0,044mm (#325)</b> | 13,0 %                  |
| <b>Água da Pasta de Consistência Normal</b>       | 28,5 %                  |
| <b>Início de Pega</b>                             | 2h50min                 |
| <b>Fim de pega</b>                                | 3h45min                 |

### 3.1.2 Agregado Miúdo

Foi utilizado agregado miúdo proveniente do Rio Caxitú no Município do Conde, Paraíba, disponível no comércio local. O referido material apresentou módulo de finura, massa unitária em estado solto e massa específica iguais a 3,35, 1,51kg/dm<sup>3</sup> e 2,60g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

### 3.1.3 Agregado Graúdo

Foi utilizado agregado graúdo com diâmetro máximo 19mm, disponível no comércio local. O referido material apresentou módulo de finura, massa unitária em estado solto e massa específica iguais a 6,97, 1,54kg/dm<sup>3</sup> e 2,63g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

### 3.1.4 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da UFPB.

### **3.1.5 Resíduo da Indústria Cerâmica**

O resíduo cerâmico (RC) utilizado no presente estudo foi proveniente da cerâmica CERAMINAS, localizada no município de Santa Rita – PB. O mesmo consistia de fragmentos de cerâmica vermelha (tijolos furados e telhas) com dimensões variadas, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

Para a sua caracterização e possível utilização como material pozolânico foi necessário que o mesmo sofresse um processo de moagem, o qual encontra-se descrito no subitem 3.2.1, visando a obtenção de uma finura adequada para tais fins.



**Figura 3.1: Resíduo da indústria cerâmica.**

### **3.1.6 Pozolana Fornecida pelo Fabricante de Cimento (FC)**

Com o intuito de efetuar uma comparação entre os resíduos de cerâmica vermelha e uma pozolana utilizada comercialmente pela indústria de cimento local, no tocante às propriedades pozolânicas e aspectos relativos à energia requerida para os seus beneficiamentos, segundo um mesmo processo de

cominuição, utilizou-se neste estudo uma pozolana fornecida pela CIPASA, fabricante do cimento Poty na Paraíba. Trata-se da pozolana que é utilizada para a produção do cimento CP II-Z (cimento portland composto com pozolana), produzido pela citada indústria, que fez a doação. Esta chegou ao Laboratório em sua forma bruta, sem nenhum beneficiamento de moagem (Figura 3.2).

A pozolana FC foi submetida a igual processo de moagem utilizado para o beneficiamento do resíduo da indústria cerâmica, porém apenas para a carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho de bolas, conforme descrito no subitem 3.2.1 vislumbrando os mesmos objetivos.



**Figura 3.2: Pozolana FC antes do beneficiamento.**

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Moagem do Resíduo da Indústria Cerâmica

Alves (2002), em seus experimentos com resíduos cerâmicos, utilizou para o beneficiamento deste tipo de resíduos um Moinho de Bolas modelo SONNEX I-4205, fabricado pela CONTENCO, disponível no Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPB, no qual eram colocados 4,5kg de material seco, aplicando-se 4500 rotações com a carga de bolas metálicas constante na Tabela 3.4. O material obtido era então peneirado nas peneiras da ABNT N<sup>os</sup> 50, 100, 200 e 325, objetivando-se utilizar o material passante na última, cuja finura era considerada a adequada para os seus experimentos.

**Tabela 3.4: Carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho (Carga 1).**

| <b>Diâmetro das Bolas<br/>(mm)</b> | <b>Quantidade de Bolas<br/>(unid.)</b> |
|------------------------------------|--|
| 40                                 | 3                                      |
| 30                                 | 10                                     |
| 25                                 | 24                                     |
| 20                                 | 108                                    |

Este procedimento para beneficiamento dos resíduos cerâmicos utilizado pelo referido autor, devido ao seu baixo rendimento, mostrou-se inadequado para os objetivos almejados neste trabalho, como a confecção de concretos, cuja demanda de material, com finura relativamente alta, era bastante considerável. A principal razão para o baixo rendimento do referido procedimento foi atribuída às dificuldades relativas à etapa de peneiramento dos resíduos após a moagem, uma vez que, em função de sua finura, aparentemente alta, as partículas do material moído aglutinavam-se facilmente, principalmente em dias de maior

umidade, dificultando, ou até mesmo impossibilitando, a passagem do material moído pelas peneiras de malha mais fina.

Como solução para eliminar a etapa de peneiramento, responsável pelo baixo rendimento do processo de beneficiamento citado anteriormente, buscou-se melhorar a eficiência do mesmo, de modo a se obter o material de finura adequada diretamente através da sua moagem.

De acordo com a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, segundo Pereira (2000), o tempo de moagem, tamanho e carga de bolas e a quantidade de produtos a moer, dentre outras variáveis, influenciam na eficiência da moagem com o Moinho de Bolas. Deste modo, tendo em vista avaliar a eficiência do processo de moagem utilizado por Alves (2002), observou-se, inicialmente, a variação da finura Blaine do RC moído com o aumento do tempo de moagem, mantendo-se constantes os demais parâmetros, segundo o procedimento descrito a seguir:

- pesagem de 10 kg de resíduo cerâmico bruto seco ao ar
- britagem durante 15 minutos no aparelho para Ensaio de Abrasão de Los Angeles, objetivando uma fragmentação inicial do RC
- pesagem para controle do rendimento
- moagem no Moinho de Bolas, utilizando a carga de bolas especificada na Tabela 3.4, até um máximo de 80.000 rotações, durante a qual retirou-se amostras de cerca 150g de material nos tempos equivalentes a 4.500, 10.000, 20.000, 30.000 rotações e assim sucessivamente a cada 10.000 rotações, até o máximo de 80.000, num total de nove amostras
- pesagem para controle do rendimento
- avaliação da massa específica e área específica das amostras segundo as NBR6474 [ABNT 1984] (Lê Chatelier) e NBRNM76 [ABNT 1998] (Blaine), respectivamente



Figura 3.3: Resíduo Cerâmico após a britagem no Aparelho de Los Angeles.

Objetivando uma melhor avaliação do referido processo de moagem, variou-se a carga de bolas, aumentando a sua quantidade em cerca de 10% do volume do moinho e mantendo-se a mesma distribuição granulométrica relativa à carga de bolas de volume equivalente a 2%, conforme o indicado na Tabela 3.5, repetindo-se o mesmo procedimento de moagem descrito anteriormente. Os resultados obtidos e os demais aspectos observados serão apresentados e discutidos no Capítulo 4.

Tabela 3.5: Carga de bolas de volume equivalente a 12% do volume interno do moinho (Carga 2).

| <b>Diâmetro das Bolas<br/>(mm)</b> | <b>Quantidade de Bolas<br/>(unid.)</b> |
|------------------------------------|--|
| 40                                 | 22                                     |
| 30                                 | 72                                     |
| 25                                 | 172                                    |
| 20                                 | 776                                    |

### **3.2.2 Moagem da Pozolana Fornecida pelo Fabricante de Cimento (FC)**

A pozolana FC foi submetida a igual processo de moagem utilizado para o beneficiamento do resíduo da indústria cerâmica, porém apenas para a carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho de bolas, conforme descrito no subitem 3.2.1.

### **3.2.3 Caracterização do Resíduo da Indústria Cerâmica**

Amostras do RC, após moído segundo o procedimento descrito no subitem 3.2.1 utilizando-se a Carga 1 de bolas e aplicadas 80.000 rotações, foram submetidas à análise química no Laboratório de Análises Mineraias do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

A caracterização mineralógica do referido resíduo foi efetuada pelo Laboratório de Solidificação Rápida da Universidade Federal da Paraíba através de análise de difração de raios-X, utilizando-se para tanto um equipamento do tipo SIEMENS DIFRAC 5000, com varredura de 2° a 90° de 2θ. Utilizou-se uma amostra do RC moído após aplicadas 80.000 rotações, passante na peneira N° 325 da série da ABNT.

A caracterização física, para cada grau de moagem, foi efetuada através de ensaios de massa específica e finura segundo as NBR6474 [ABNT 1984] (método do Frasco Volumétrico de Le Chatelier) e NBRNM76 [ABNT 1998] (permeabilidade ao ar com permeômetro de Blaine) respectivamente.

### **3.2.4 Caracterização da Pozolana FC**

A caracterização da pozolana FC foi executada segundo os mesmos procedimentos utilizados para o RC no tocante a mineralogia e aspectos físicos.



### 3.2.5 Ensaio de Início e Fim de Pega

Os ensaios de início e fim de pega foram executados de acordo com a NBR11581 [ABNT 1991] (método do Aparelho de Vicat - Figura 3.4) em amostras de pastas contendo apenas cimento Portland, utilizadas como referência, e em amostras de pastas de cimento contendo 20% e 40% de resíduo cerâmico em substituição ao cimento (em massa), dotado de duas finuras distintas, obtidas após aplicadas 40.000 e 80.000 rotações no moinho de bolas carregado com a *Carga 1* constante na Tabela 3.4 no subitem 3.2.1.

Foram moldadas 10 amostras, duas de referência e duas para cada teor substituição e finura avaliados. Os resultados apresentados no Capítulo 4 são uma média dos valores obtidos para cada par de amostras.



Figura 3.4: Ensaio de início e fim de pega utilizando o Aparelho de Vicat.

### 3.2.6 Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Os ensaios de Índice de Atividade Pozolânica com Cal para o resíduo cerâmico e para a pozolana FC foram executados conforme as prescrições da NBR5751 [ABNT 1992].

De acordo com a referida norma, este ensaio é uma medida direta do grau de pozolanicidade de um dado material, através da determinação da resistência à compressão simples, conforme a NBR7215 [ABNT 1996], de corpos-de-prova de argamassas preparadas no traço 1:2:9 (cal:pozolana:areia), rompidos aos 7 dias de idade. A quantidade de água utilizada é a necessária para que a mistura alcance o índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm na mesa de consistência padrão, conforme a NBR13276 [ABNT 1995].

A indisponibilidade de material suficiente impossibilitou a realização dos ensaios relativos a todas as finuras obtidas durante os processos de cominuição do resíduo cerâmico e da pozolana FC. Deste modo, o efeito da variação da finura no Índice de Atividade Pozolânica com Cal destes materiais foi avaliado apenas para duas finuras distintas da pozolana FC, ambas obtidas com a carga de bolas de volume equivalente a 2% do volume interno do moinho, após aplicadas 40.000 e 80.000 rotações, e para três finuras distintas do resíduo.

### 3.2.7 Dosagem dos Concretos e Argamassas

Utilizou-se o procedimento de dosagem experimental para a obtenção de um concreto de referência de classe C30 com fator água/aglomerante fixado em 0,5, tendo como resultado o seguinte traço unitário em massa: 1:1,55:2,19. Seu consumo de cimento foi da ordem de  $445 \text{ kg/m}^3$  e o percentual de argamassa igual a 54%. O abatimento de tronco de cone, avaliado segundo a NBR 7223 [ABNT 1992], foi igual a 130mm sem a utilização de nenhuma espécie de aditivo químico.

Como traço a ser utilizado para a argamassa de referência adotou-se a composição da matriz do concreto de referência, com o seguinte traço unitário em massa: 1:1,55. O consumo de cimento neste caso foi da ordem de 700 kg/m<sup>3</sup>. O fator água/aglomerante também foi mantido fixo em 0,5.

### 3.2.8 Ensaios de Absorção

Os ensaios de absorção, caracterizados pela obtenção da absorção por capilaridade (absortividade), porosidade total, índice de vazios e massa específica no estado saturado, foram executados em amostras de argamassa e de concreto, cujas composições variaram de acordo com o apresentado na Tabela 3.6. Conforme a referida tabela, tanto as misturas de argamassa (RC0, RC20 e RC40) quanto as de concreto (CRC0, CRC20 e CRC40) utilizaram 0% (referência), 20% e 40% de substituição do cimento Portland por resíduo cerâmico moído de finura Blaine igual a 6040 cm<sup>2</sup>/g. O fator água/aglomerante foi mantido fixo em 0,5 para todas as misturas. Nenhuma espécie de aditivo químico foi utilizada.

Tabela 3.6: Proporção e consumo dos materiais utilizados no programa experimental.

| Mistura      | Proporção Unitária (em massa) |     |       |       | Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) |     |       |       |
|--------------|-------------------------------|-----|-------|-------|------------------------------|-----|-------|-------|
|              | Cimento                       | RC  | Areia | Brita | Cimento                      | RC  | Areia | Brita |
| <b>RC0</b>   | 1                             | 0   | 1,55  | -     | 700                          | 0   | 1085  | -     |
| <b>RC20</b>  | 0,8                           | 0,2 | 1,55  | -     | 560                          | 140 | 1085  | -     |
| <b>RC40</b>  | 0,6                           | 0,4 | 1,55  | -     | 420                          | 280 | 1085  | -     |
| <b>CRC0</b>  | 1                             | 0   | 1,55  | 2,19  | 442                          | 0   | 685   | 968   |
| <b>CRC20</b> | 0,8                           | 0,2 | 1,55  | 2,19  | 354                          | 88  | 685   | 968   |
| <b>CRC40</b> | 0,6                           | 0,4 | 1,55  | 2,19  | 265                          | 177 | 685   | 968   |

Adotou-se a idade de 56 dias como idade de controle para os ensaios de absorção, haja vista esta ser a máxima idade avaliada nos ensaios de resistência à compressão simples.

As argamassas tiveram sua consistência avaliada na mesa de consistência padrão, segundo a NBR 13276 [ABNT 1995] e os concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone, segundo a NBR 7223 [ABNT 1992].

As amostras de argamassa e de concreto foram constituídas de corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 5x10 cm e 10x10 cm (diâmetro x altura), respectivamente. A cura durante as primeiras 24 horas foi efetuada em ambiente de laboratório (ao ar e em temperatura ambiente – cerca de 28°C) ainda nos próprios moldes, os quais foram envolvidos por sacos plásticos para evitar uma perda prematura de umidade. Após o desmolde e até a idade de 7 dias, metade das amostras (amostras de controle) foi imersa em água à temperatura ambiente (cerca de 23°C). A metade restante foi imersa em água à temperatura controlada de 55°C. A partir dos 7 dias todas as amostras foram curadas ao ar, em ambiente de laboratório, até a idade do ensaio. O objetivo da utilização da cura a uma temperatura mais elevada foi o de buscar acelerar a cinética das reações pozolânicas.

Foram moldados 06 corpos-de-prova para cada mistura, sendo 03 amostras por mistura para cada temperatura de cura distinta, num total de 18 amostras de argamassa e 18 de concreto.

A determinação da absorvidade obedeceu aos critérios da NBR 9779 [ABNT 1995]. Neste ensaio avalia-se a velocidade de penetração de água nas amostras por sucção capilar, através de seu ganho de massa em função do tempo.

A porosidade total foi obtida conforme NBR 9778 [ABNT 1990] que também permite a obtenção do índice de vazios e da massa específica. Neste ensaio a saturação das amostras foi obtida mediante imersão em água à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C durante 72 horas, seguida da imersão em água em ebulição durante 5 horas. A partir do ensaio de porosidade total obtém-se o volume de poros da mistura acessível à água, não diferenciando os tipos de poros presentes.

A Figura 3.5 e Figura 3.6 ((a) e (b)) referem-se à realização do ensaio de absorção por capilaridade em argamassas.



(a)

(b)

Figura 3.5: Ensaio de absortividade.



(a)

(b)

Figura 3.6: Controle do nível de água no ensaio de absorvidade.

### **3.2.9 Ensaio de Resistência à Compressão Simples de Concretos**

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados em conformidade com a NBR 5739 [ABNT 1994]. Foram utilizadas amostras cilíndricas de concreto, de dimensões 10x20 cm (diâmetro x altura), cujas composições variaram de acordo com o apresentado na Tabela 3.6 (misturas CRC0, CRC20 e CRC40) no subitem 3.2.8. Foram avaliadas amostras com idades de 14 e 56 dias.

O processo de cura das amostras avaliadas neste ensaio seguiu a mesma metodologia descrita anteriormente, no subitem 3.2.8, para as amostras relativas aos ensaios de absorção, vislumbrando os mesmos objetivos. Os concretos tiveram sua resistência à compressão simples avaliada aos 14 e 56 dias de idade.

Foram moldados 06 corpos-de-prova para cada mistura, sendo 03 amostras por mistura para cada temperatura de cura e idade de ensaio avaliadas, num total de 36 amostras.

### **3.2.10 Medidas Eletroquímicas: pHs das Soluções de Imersão, Potenciais e Correntes de Corrosão.**

Objetivando avaliar o efeito do ataque de íons cloreto na corrosão das armaduras de concretos contendo resíduo cerâmico moído como substituto parcial do cimento, foram confeccionados corpos de prova prismáticos de dimensões (4,5x7,0x10,0)cm (Figura 3.8) de acordo com as composições especificadas para as misturas CRC0, CRC20 CRC40 na Tabela 3.6, contendo uma pequena barra de aço CA50 com cerca de 6,5cm de comprimento e 5mm de diâmetro, cuja área em contato com a matriz, exposta ao ataque de agentes agressivos, foi restringida a 5cm<sup>2</sup> através de sua pintura com resina epóxi (Figura 3.7). A espessura de cobertura utilizada foi de 1 cm (Figura 3.9).

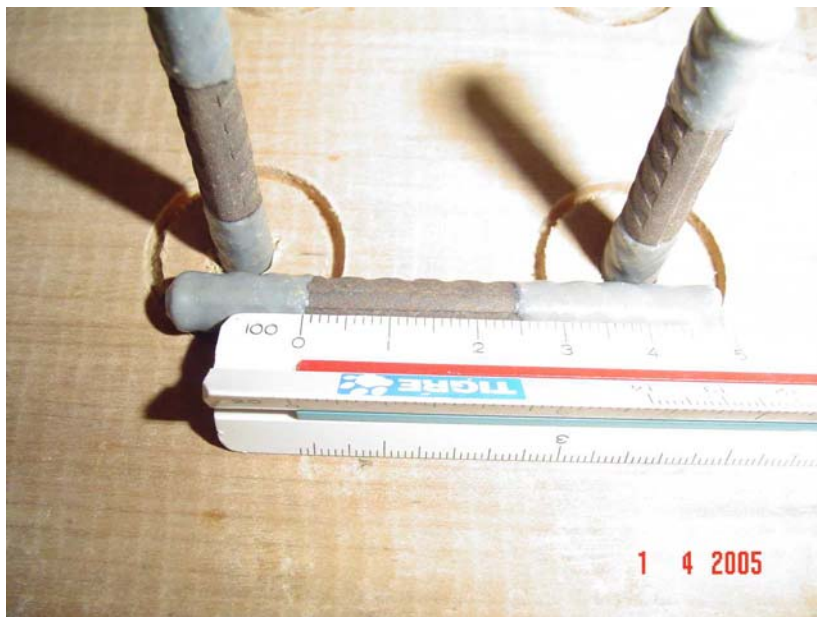


Figura 3.7: Ferragem utilizada na confecção dos corpos-de-prova utilizados para as medidas eletroquímicas.



Figura 3.8: Moldagem dos corpos-de-prova utilizados para as medidas eletroquímicas.





Figura 3.9: Corpos-de-Prova utilizados para as medidas eletroquímicas.

Foram confeccionados 06 corpos-de-prova para cada mistura avaliada, num total de 18 amostras. O processo de cura utilizado seguiu a mesma metodologia descrita no subitem 3.2.8, para as amostras relativas aos ensaios de absorção, até a idade de 28 dias. A partir desta idade, as amostras foram divididas em seis grupos, cada um deles contendo três amostras referentes a uma mesma mistura, os quais foram imersos em soluções distintas Figura 3.11, de acordo com a Tabela 3.7, até a idade de 162 dias, quando foram efetuadas as últimas medições de pH. A imersão das amostras nas soluções se deu conforme esquema apresentado na Figura 3.10.

Tabela 3.7: Soluções de imersão avaliadas.

| Grupo | Mistura | Solução de Imersão |
|-------|---------|--------------------|
| 1     | CRC0    | Água Deionizada    |
| 2     | CRC20   |                    |
| 3     | CRC40   |                    |
| 4     | CRC0    | Solução Salina*    |
| 5     | CRC20   |                    |
| 6     | CRC40   |                    |

\* solução de água deionizada contendo 3,5% (em massa) de cloreto de sódio

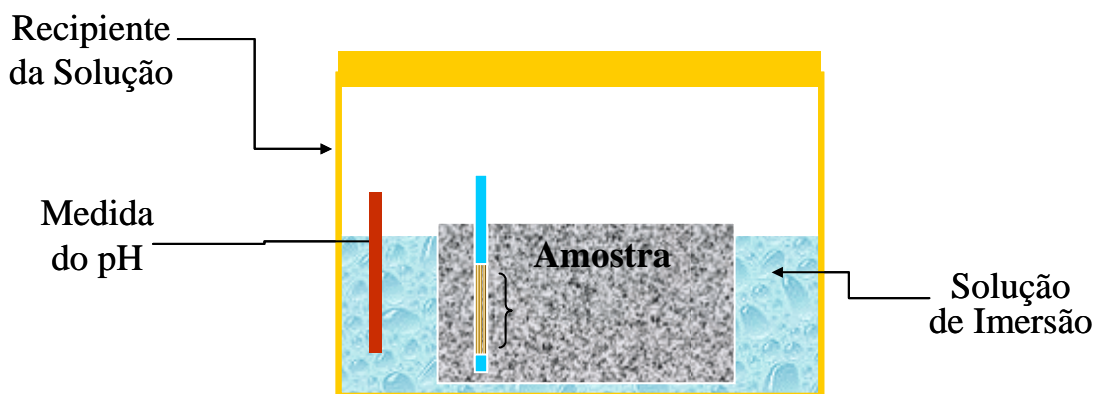


Figura 3.10: Desenho esquemático da amostra em solução.

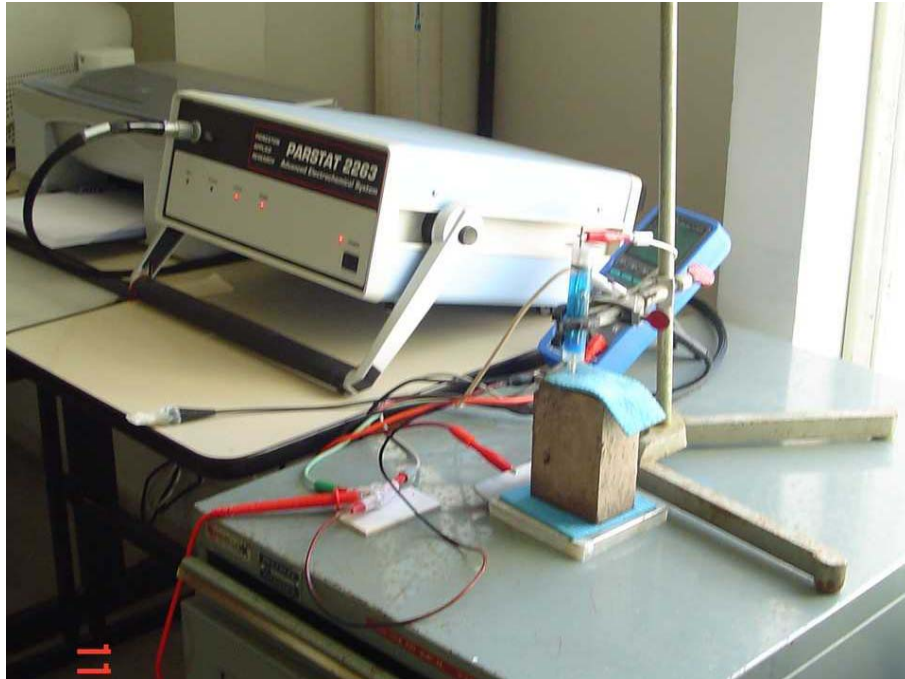


(a)

(b)

Figura 3.11: Grupo (a) subgrupo (b) de amostras imersas em solução.

As medidas de pH foram efetuadas, semanalmente e até a idade de 162 dias, diretamente nas soluções de imersão utilizando-se um medidor de pH digital. Nas mesmas datas foram efetuadas as medidas dos potenciais e correntes de corrosão, executadas nas amostras saturadas, imediatamente após sua retirada das respectivas soluções. Utilizou-se para tanto um potenciostato modelo PARSTAT 2263 Advanced Electrochemical System e um eletrodo de referência de Cobre/Sulfato de Cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) (Figura 3.12).



**Figura 3.12: Execução das medidas de potencial de corrosão.**

## *Capítulo 4 – Resultados e Discussão*

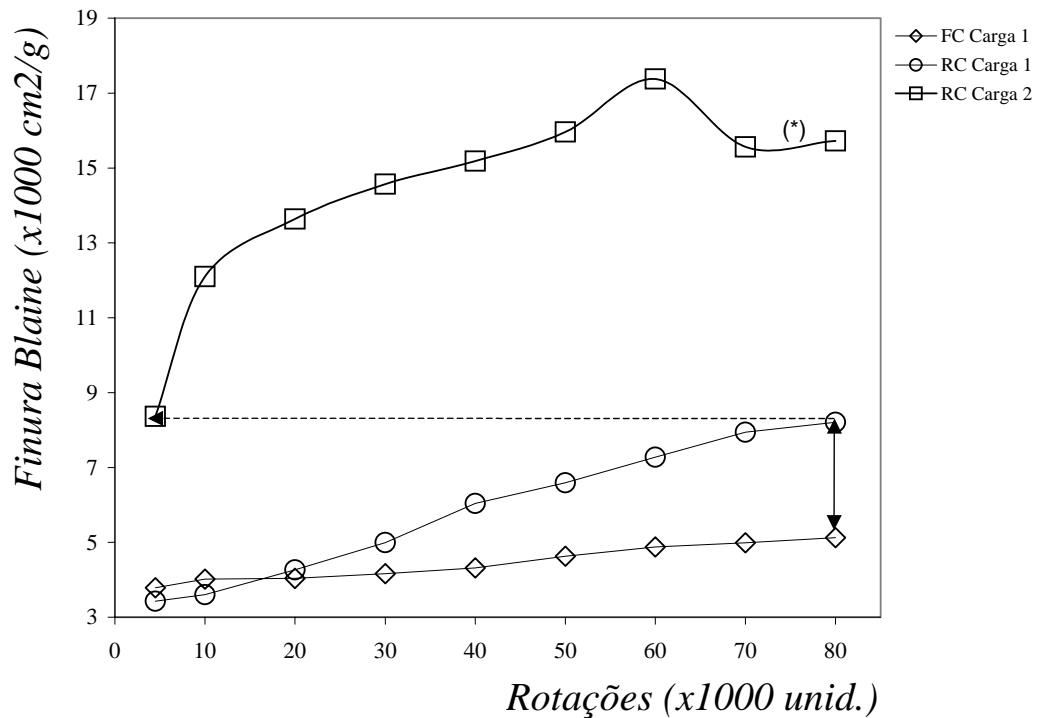
---

### **4.1 Beneficiamento do Resíduo Cerâmico (RC) e da Pozolana FC**

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam os resultados obtidos após os processos de cominuição do Resíduo Cerâmico e da pozolana FC, descritos no subitem 3.2.1 do Capítulo 3, conforme a carga de bolas utilizada.

**Tabela 4.1: Finura Blaine das pozolanas em função da carga de bolas utilizada para moagem.**

| Rotações<br>(x1000unid) | Tempo de Moagem<br>(min) | Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g) |         |         |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------|---------|
|                         |                          | Pozolana FC                        | RC      |         |
|                         |                          | Carga 1                            | Carga 1 | Carga 2 |
| 4,5                     | 72                       | 3788                               | 3427    | 8365    |
| 10                      | 161                      | 4018                               | 3601    | 12097   |
| 20                      | 322                      | 4040                               | 4267    | 13636   |
| 30                      | 484                      | 4161                               | 4997    | 14570   |
| 40                      | 645                      | 4319                               | 6039    | 15184   |
| 50                      | 806                      | 4629                               | 6593    | 15957   |
| 60                      | 968                      | 4877                               | 7273    | 17379   |
| 70                      | 1129                     | 4986                               | 7944    | 15560   |
| 80                      | 1290                     | 5127                               | 8209    | 15725   |



**Figura 4.1:** Variação da finura do resíduo cerâmico e da pozolana FC com o tempo de moagem conforme a carga da carga de bolas utilizada.

Na Figura 4.1 observa-se a variação da finura do resíduo cerâmico e da pozolana (FC) com o tempo de moagem, expresso em número de rotações do moinho, e conforme a carga de bolas utilizada. Pode-se observar a maior taxa de aumento da finura do RC em relação a pozolana FC para as mesmas condições de moagem (carga de bolas e número de rotações). Isto evidencia que o RC requer menor esforço de cominuição do que a pozolana FC e, conseqüentemente, menor consumo energético para a obtenção de finuras semelhantes.

Com o aumento da carga de bolas, pode ser facilmente visualizada uma melhora na eficiência do processo de moagem do RC, caracterizado pela obtenção de maiores finuras para os mesmos números de rotações aplicadas. De fato, com a maior carga de bolas, para 4500 rotações (cerca de uma hora de moagem), já foram observadas finuras superiores à máxima finura obtida para este resíduo após 80.000 rotações (cerca de 24 horas de moagem) com a carga inferior. Estes resultados dão apenas um indicativo de que o referido processo pode ser

ainda otimizado. Contudo, a diversidade dos parâmetros envolvidos em processos desta natureza, tais como a quantidade e umidade dos produtos a moer, além do tipo, granulometria e carga de bolas, demanda um estudo específico para este fim.

Na curva referente à moagem do RC com a maior carga de bolas observa-se um valor máximo de finura em torno de 60.000 rotações a partir do qual percebe-se uma tendência à redução destes valores. Esta diminuição pode ser explicada pela aglutinação das partículas do resíduo, ocasionada pelo aumento da tensão superficial entre as mesmas, em razão de sua elevada superfície específica. Deste modo, pode-se considerar que, com relação ao resíduo cerâmico, a partir deste ponto (60.000 rotações), para as referidas condições de operação, o processo de cominuição utilizado torna-se ineficiente.

## **4.2 Caracterização do Resíduo Cerâmico e da Pozolana FC**

### **4.2.1 Análise Química**

Os resultados da análise química do resíduo cerâmico (RC) encontram-se apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2: Composição química do Resíduo Cerâmico RC (% em massa)**

|                                    | <b>RC</b> |
|------------------------------------|-----------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 62,25     |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 5,99      |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 22,11     |
| <b>CaO</b>                         | Traços    |
| <b>MgO</b>                         | Traços    |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 1,06      |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 1,24      |
| <b>RI (Resíduo Insolúvel)</b>      | 5,80      |
| <b>Perda ao Fogo</b>               | 1,29      |

A composição química do Resíduo Cerâmico indica que o mesmo atende aos limites da NBR12653 [ABNT 1992] para uso como material pozolânico em misturas com cimento Portland uma vez que a soma dos compostos  $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$  foi de 90,35% e, conseqüentemente, superior ao mínimo de 70% estabelecido por esta norma. Não foi observada a presença de  $SO_3$ .

#### 4.2.2 Análise Mineralógica

A Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam, respectivamente, os espectros de difração de Raios-X do Resíduo Cerâmico e da Pozolana FC. As composições mineralógicas do resíduo cerâmico (RC) e da pozolana FC encontram-se apresentadas na Tabela 4.3.

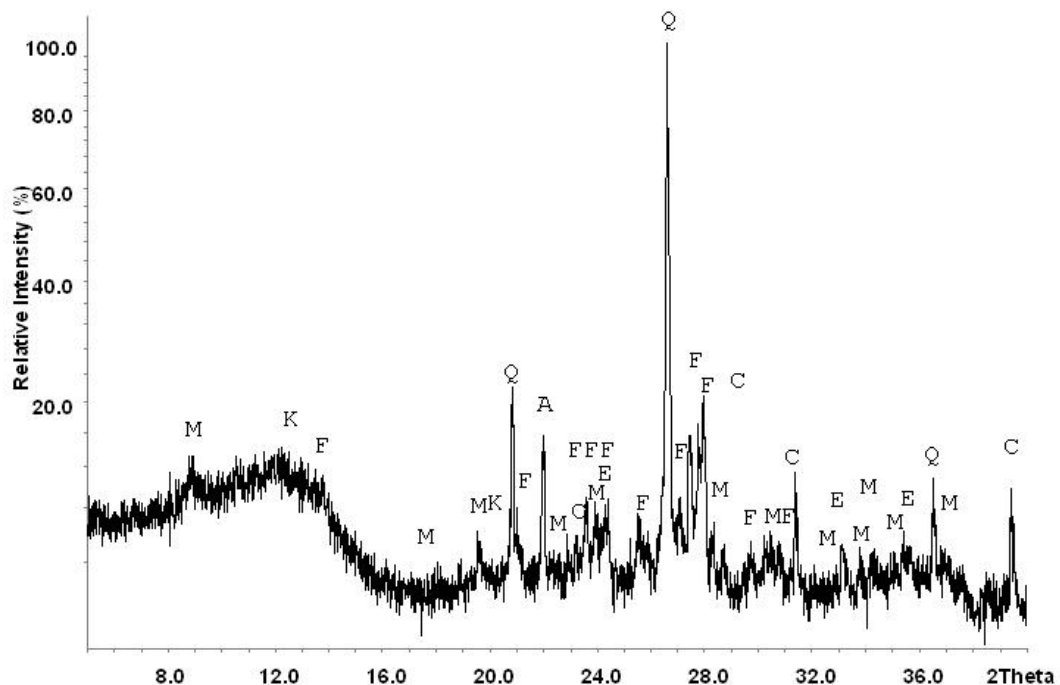


Figura 4.2: Espectro de difração de Raios-X do resíduo cerâmico moído: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline.

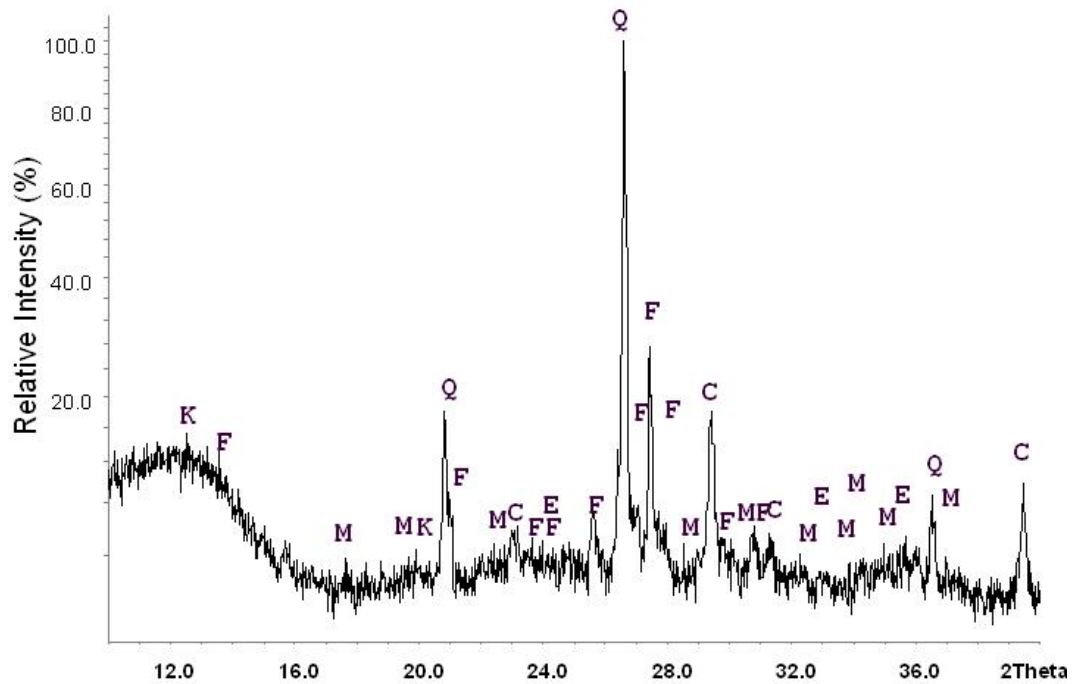


Figura 4.3: Espectro de difração de Raios-X da pozzolana FC: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline.

Tabela 4.3: Composição mineralógica das pozzolanas de acordo com os padrões difratométricos.

| Código | Fase      | Jcps    | Fórmula Química                              | Pozzolana(*) |               |
|--------|-----------|---------|--|--------------|---------------|
|        |           |         |  | RC           | FC            |
| Q      | QUARTZO   | 85-1780 | $SiO_2$                                      | XXXX         | XXXX          |
| C      | CALCITA   | 86-174  | $CaCO_3$                                     | X            | XX            |
| E      | HEMATITA  | 85-599  | $Fe_2O_3$                                    | XX           | Não detectado |
| K      | CAULINITA | 83-971  | $Al_2.(Si_2O_5).(OH)_4$                      | traços       | Traços        |
| F      | FELDSPATO | 84-710  | $K_{0,5}.Na_{0,5}.Al.Si_3.O_8$               | XX           | XXX           |
| A      | ALBITA    | 19-1184 | $Na.Al.Si_3.O_8$                             | XXXX         | Não detectado |
| M      | MICROLINE | 76-831  | $K_{0,94}.Na_{0,06}.Al_{1,01}.Si_{2,99}.O_8$ | XXX          | XX            |

(\*) análise semi-quantitativa baseada na intensidade dos picos dos padrões difratométricos



Observa-se que ambas as pozolanas podem conter traços de caulinita, porém o pico largo entre  $10^\circ 2\theta$  a  $16^\circ 2\theta$  pode ser indicativo da presença do composto amorfo metacaulinita, formado durante o processo de calcinação para o resíduo cerâmico (RC), que não pode ser detectado por difração de Raios-X. É importante salientar que ambas as pozolanas contêm materiais cristalinos, pouco ou não reativos no sistema pozolana-cimento, os quais atuam apenas como filler. No entanto, o resíduo cerâmico aparenta apresentar mais material *inerte* (material que ao reagir com os hidratados do cimento não desenvolvem ganho de resistência mecânica) do que a pozolana FC, evidenciado pela presença de hematita, albita e picos mais intensos de microlina. Também se faz importante ressaltar que a detecção de alguns minerais, tais como a microlina e a caulinita, se faz bastante complexa, tendo em vista a baixa intensidade dos seus picos, distribuídos bem próximos ao ruído de fundo dos espectros difratométricos.

#### 4.2.3 Massa Específica

As massas específicas do resíduo cerâmico e da pozolana FC, utilizadas para efeito da determinação da Finura Blaine, encontram-se apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Massas específicas das pozolanas.

| Material         | Pozolana FC<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Pozolana RC<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |         |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Massa Específica | Carga 1                             | Carga 1                             | Carga 2 |
|                  | 2,51                                | 2,58                                | 2,76    |

Observa-se que a massa específica das pozolanas é inferior à do cimento Portland, que é da ordem de 3,00 a 3,15 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 Efeito da Variação da Finura nos Índices de Atividade Pozolânica do Resíduo Cerâmico e da Pozolana FC

#### 4.3.1 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com Cal

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de IAP com cal, e sua variação com a finura, para o resíduo cerâmico e para a pozolana FC encontram-se apresentados na Tabela 4.5 e Tabela 4.6, respectivamente.

Tabela 4.5: IAP com cal do RC e sua variação com a finura.

| Nº de Rotações do Moinho (x 10 <sup>3</sup> unid.) | Carga de bolas do Moinho | Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | IAP (MPa) |
|--|--------------------------|------------------------------------|-----------|
| 40   | 2%                       | 6039                               | 6,8       |
| 80   | 2%                       | 8209                               | 8,8       |
| 80   | 12%                      | 15725                              | 8,9       |

Tabela 4.6: IAP com cal da pozolana FC e sua variação com a finura.

| Nº de Rotações do Moinho (x 10 <sup>3</sup> unid.) | Carga de bolas do Moinho | Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | IAP (MPa) |
|--|--------------------------|------------------------------------|-----------|
| 40   | 2%                       | 4319                               | 5,8       |
| 80   | 2%                       | 5127                               | 7,3       |

Os resultados indicam que existe um aumento da atividade pozolânica com o aumento da finura para ambas as pozolanas. No entanto, especificamente na pozolana RC, este efeito não se dá de forma linear, uma vez que a taxa de aumento do IAP é reduzida com o aumento da finura.

Estas observações estão de acordo com Drever (1997) *apud* Torres (2004), segundo o qual uma maior superfície específica reduz a energia de precipitação de íons, aumentando, conseqüentemente, o potencial de precipitação dos produtos de hidratação do cimento. Quando o material pulverulento é também quimicamente reativo, como é o caso das pozolanas esta redução da energia de precipitação de íons, implica ainda em um aumento do potencial de reação deste material.

Embora a atividade pozolânica com cal seja aumentada com o incremento da finura, conforme explicitado anteriormente, maiores teores de substituição de cimento por materiais pozolânicos com superfícies específicas muito elevadas podem aumentar a demanda de água para se obter a mesma consistência de matrizes sem substituição. Conseqüentemente, os benefícios da atividade pozolânica com maior finura podem ser contrapostos pelo aumento desta água. Deste modo, a utilização de superplastificantes deve ser considerada para que um demasiado aumento do fator água/aglomerante não venha a ser prejudicial para a resistência.

Com relação à normatização pertinente, todos os resultados aqui apresentados, excetuando-se aqueles relativos à pozolana FC beneficiada com 40.000 rotações do moinho, encontram-se acima do valor mínimo de 6,0 MPa estabelecido pela NBR 12653 [ABNT 1992].

#### **4.3.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento**

Os resultados obtidos a partir da variação de sua finura dos Índices de Atividade Pozolânica do RC e da Pozolana FC, substituindo 35% do cimento conforme a NBR5752 [ABNT 1992], encontram-se apresentados nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8, respectivamente. As amostras de referência (sem pozolana) utilizadas para a determinação destes índices, obtiveram resistência média aos 28 dias de 25,8 MPa.

Tabela 4.7: IAP com cimento do RC e sua variação com a finura.

| <b>Nº de Rotações<br/>do Moinho<br/>(x 10<sup>3</sup> unid.)</b> | <b>Carga de bolas<br/>do Moinho</b> | <b>Finura<br/>Blaine<br/>(cm<sup>2</sup>/g)</b> | <b>Resistência Média<br/>(MPa)</b> | <b>IAP<br/>(%)</b> |
|--|-------------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| 4,5  |                                     | 3427  | 15,6                               | 60,5               |
| 10   |                                     | 3601  | 16,1                               | 62,5               |
| 20   |                                     | 4267  | 16,3                               | 63,3               |
| 30   |                                     | 4997  | 17,8                               | 69,0               |
| 40   | 2%                                  | 6039  | 21,0                               | 81,4               |
| 50   |                                     | 6593  | 19,9                               | 77,3               |
| 60   |                                     | 7273  | 19,5                               | 75,6               |
| 70   |                                     | 7944  | 21,8                               | 84,7               |
| 80   |                                     | 8209  | 20,5                               | 79,7               |
| 80   | 12%                                 | 15725   | 22,7                               | 87,9               |

Tabela 4.8: IAP com cimento da Pozolana FC e sua variação com a finura.

| <b>Nº de Rotações<br/>do Moinho<br/>(x 10<sup>3</sup> unid.)</b> | <b>Carga de bolas<br/>do Moinho</b> | <b>Finura Blaine<br/>(cm<sup>2</sup>/g)</b> | <b>Resistência Média<br/>(MPa)</b> | <b>IAP<br/>(%)</b> |
|--|-------------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| 40   | 2%                                  | 4319  | 18,4                               | 71,5               |
| 80   | 2%                                  | 5127  | 34,8                               | 134,8              |

Observa-se a partir destes resultados que índices em conformidade com a norma NBR5752 [ABNT 1992], ou seja, superiores a 75%, só foram obtidos a partir de finuras superiores a 5000 cm<sup>2</sup>/g tanto para o RC quanto para a pozolana FC.

Neste sistema com cimento pode-se observar, a partir dos resultados apresentados, que a pozolana FC obteve índices superiores ao resíduo RC para

finuras semelhantes (4997 cm<sup>2</sup>/g do RC com relação a 5127 cm<sup>2</sup>/g da pozolana FC).

De um modo geral, os valores obtidos nos ensaios de IAP com cimento, tanto para o resíduo cerâmico quanto para a pozolana FC, confirmam o papel da reação destes pós com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento, sendo a alita (C<sub>3</sub>S) a fase que mais contribui para esta reação nas primeiras idades (TAYLOR, 1999). No entanto, reações mais retardadas oriundas da hidratação da belita (C<sub>2</sub>S) podem ser esperadas, o que pode contribuir para um maior aumento do IAP em idades avançadas, potencializando ainda mais o efeito positivo da substituição do cimento por estas pozolanas.

### **4.3.3 Correlação entre os Índices de Atividade Pozolânica Obtidos**

Uma comparação entre os índices de atividade pozolânica obtidos nos sistemas pozolana-cal e pozolana-cimento para o resíduo cerâmico pode ser vista na Figura 4.4. Para o sistema com cal, o IAP percentual foi calculado tendo como referência o IAP obtido em sistema semelhante para uma metacaulinita calcinada por Oliveira (2005), de finura Blaine igual a 1,93 m<sup>2</sup>/g, cujo valor foi de 8,5 MPa.

Como já discutido anteriormente, o aumento da atividade pozolânica com o aumento da finura foi observado em ambos os sistemas. Contudo, esta variação não se deu de forma linear, haja vista que finuras em torno de 8.000 cm<sup>2</sup>/g tiveram desempenhos equivalentes às superiores a 15.000 cm<sup>2</sup>/g em ambos os sistemas. Esta última observação tem implicações para a determinação de uma finura ótima da pozolana, tanto em relação à sua performance como material pozolânico quanto ao fator energético do seu processo de beneficiamento. Assim, em princípio, uma finura de 8000 cm<sup>2</sup>/g parece ser um valor conveniente para o resíduo cerâmico em estudo, sob este ponto de vista.

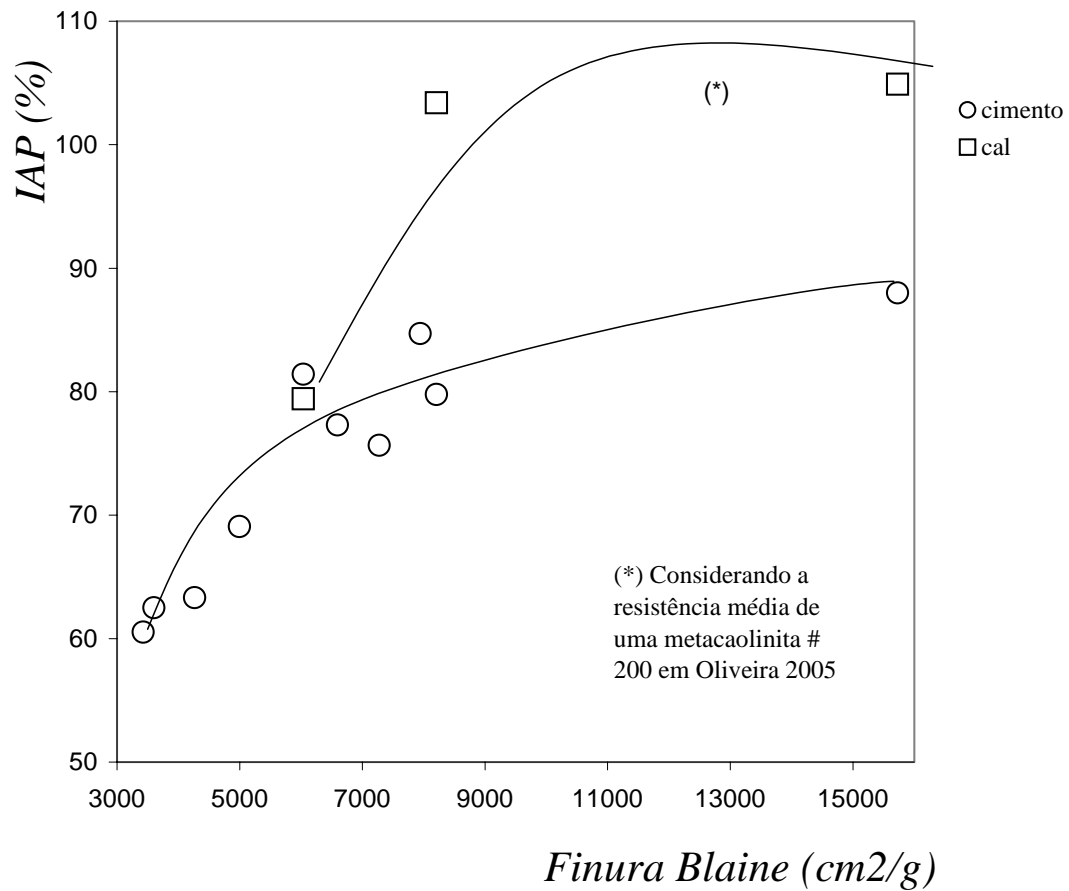


Figura 4.4: Variação dos índices de atividade pozolânica com cimento e com cal com a finura do RC.

#### 4.4 Efeito da Variação da Finura nos Tempos de Pega de Pastas de Cimento Contendo RC

Tão importantes quanto as propriedades mecânicas do material endurecido são as propriedades da mistura no estado fresco, haja vista a reconhecida habilidade dos concretos em se moldarem às mais variadas formas arquitetônicas do espaço urbano. Desta forma, se faz pertinente investigar como as propriedades frescas, tais como a consistência e o tempo de pega, são afetadas pela substituição do cimento por material pozolânico de finuras variadas.

A Tabela 4.9 mostra os dados reais dos tempos de pega obtidos para duas finuras e dois teores de substituição do cimento em pastas contendo o resíduo cerâmico utilizando o aparelho de Vicat de acordo com a NBR11581 [ABNT 2001]. Os fatores água/cimento e água/aglomerante, determinados para a obtenção da consistência padrão segundo a mesma norma, também se encontram apresentados nesta tabela.

**Tabela 4.9: Resultados obtidos no ensaio de início e fim de pega segundo a NBR11581 [ABNT 2001].**

| Teor de Substituição | Finura RC (cm <sup>2</sup> /g) | Consistência Normal |            | Tempo de Pega (h) |      |
|----------------------|--------------------------------|---------------------|------------|-------------------|------|
|                      |                                | a / cim             | a / aglom. | Início            | Fim  |
| 0%                   | -                              | 0,28                | 0,28       | 3:03              | 4:00 |
| 20%                  | 6039                           | 0,34                | 0,28       | 3:15              | 4:20 |
| 40%                  | 6039                           | 0,49                | 0,30       | 3:30              | 4:35 |
| 20%                  | 8209                           | 0,36                | 0,29       | 2:30              | 3:30 |
| 40%                  | 8209                           | 0,52                | 0,31       | 2:45              | 3:45 |

Observa-se que a relação água/aglomerante para se obter a consistência padrão da pasta variou pouco quando se substituiu parcialmente o cimento por resíduos cerâmicos.

Segundo a norma utilizada, os tempos de início de pega não devem ser inferiores a 1 (uma) hora. Para os tempos relativos ao fim de pega a mesma especifica que os mesmos não excedam um total de 10 horas. Deste modo, pode-se considerar que os resultados obtidos encontram-se dentro do intervalo estabelecido.

Para investigar o efeito das variáveis *teor de substituição do cimento e superfície específica do resíduo*, bem como a interação entre ambas nos tempos de pega de misturas contendo esta adição, fez-se uma análise estatística onde os

parâmetros de um polinômio foram estimados utilizando-se o método dos mínimos quadrados disponível no programa Solver do Excel da Microsoft.

A Figura 4.5 representa os modelos obtidos a partir dos parâmetros estimados na qual os valores reais verificados durante os ensaios também encontram-se assinalados, de modo a demonstrar a validade destes modelos.

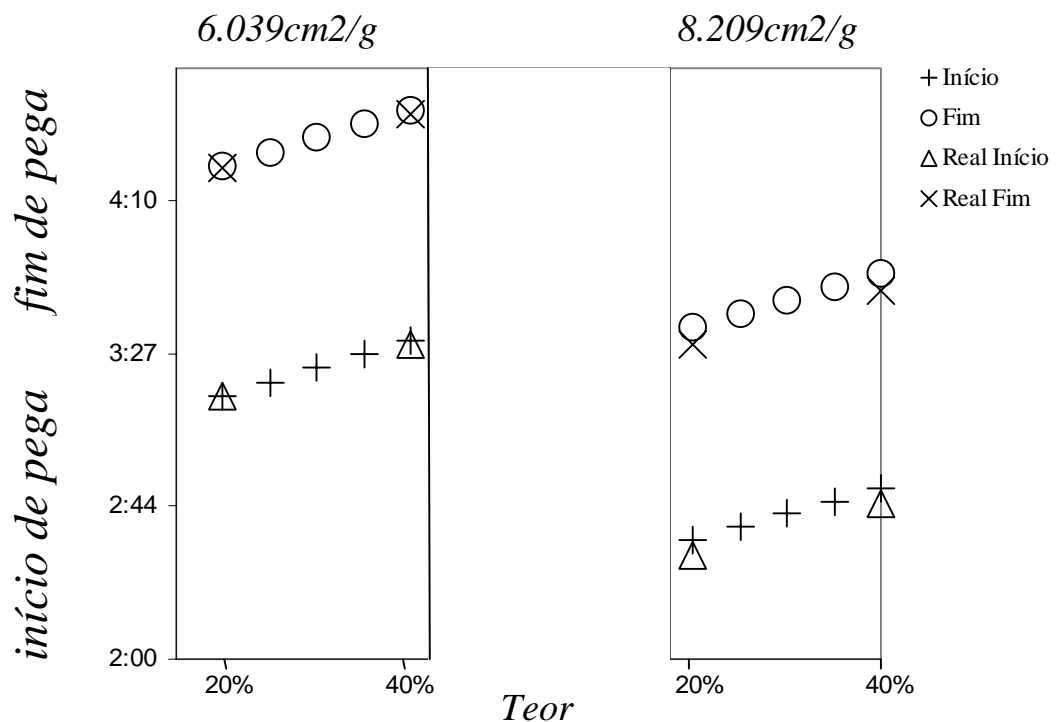


Figura 4.5: Efeito do teor de substituição do cimento e da variação da finura nos tempos de pega de pastas contendo RC.

Tanto para o tempo de início de pega quanto para o tempo de fim de pega, observa-se uma menor influência do aumento do teor de substituição do que do aumento da finura. Na verdade, quanto maior a superfície específica do resíduo, menor os tempos de pega observados.

Um maior efeito da finura no tempo de pega pode estar associado com o entendimento de que uma maior finura, caracterizada pelo aumento da



superfície específica do resíduo, implicará em um aumento da cinética das reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente em uma maior possibilidade de precipitação dos produtos oriundos destas reações, como o C-S-H, o CH e principalmente os aluminatos de cálcio, primordialmente responsáveis pelo tempo de pega (TAYLOR, 1990).

Embora pequenas variações no tempo de início e fim de pega tenham sido observadas para as pastas contendo os resíduos em ambos os teores de substituição e finuras, não houve uma variação significativa com relação à amostra de controle, sem substituição (Tabela 4.9), o que pode contribuir para favorecer a recomendação do uso deste resíduo como material de substituição do cimento.

## **4.5 Influência do Teor de Substituição e da Temperatura de Cura na Absorção de Argamassas Contendo Resíduo Cerâmico**

### **4.5.1 Variação da Consistência das Argamassas pela Adição do RC**

A variação da consistência das argamassas contendo o Resíduo Cerâmico com o aumento do teor de substituição do cimento pelo mesmo, mantido constante o fator água-aglomerante, pode ser vista na Figura 4.6. Observou-se que, quanto maior o teor de substituição do cimento pelo RC, menor a consistência das argamassas, de acordo com uma tendência linear. Esta tendência pode ser explicada pelo fato do RC utilizado ter superfície específica (igual a  $6039 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) aproximadamente uma vez e meia maior do que a do cimento, o que proporciona uma maior demanda de água para envolver os seus grãos quando comparados com as argamassas de controle, sem substituição.

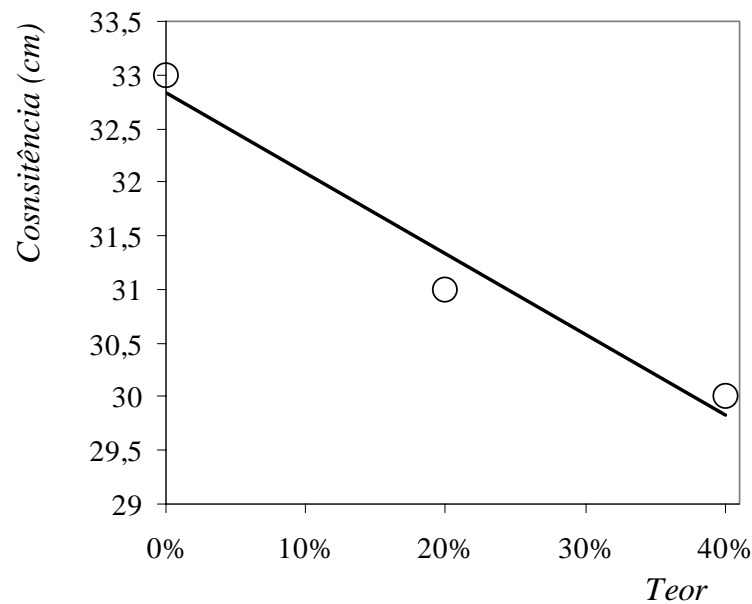


Figura 4.6: Variação da consistência das argamassas com o teor de substituição de RC.

#### 4.5.2 Porosidade Total, Índice de Vazios e Massa Específica

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos para porosidade total, índice de vazios e massa específica no estado saturado de argamassas contendo 0%, 20% e 40% de substituição do cimento por resíduo cerâmico com superfície específica igual a  $6039 \text{ cm}^2/\text{g}$ , submetidas a duas temperaturas distintas de cura (ambiente – em torno de  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), segundo metodologia especificada no Capítulo 3. Os coeficientes de variação especificados na referida tabela foram determinados considerando-se 95% de confiabilidade.

De acordo com os dados constantes na referida tabela, pode-se verificar que não houve variação significativa nos valores relativos à massa específica das argamassas com os parâmetros considerados: temperatura de cura e teor de substituição.

Tabela 4.10: Variação da porosidade total, índice de vazios e massa específica com o teor de substituição e com a temperatura de cura de argamassas contendo RC.

| Mistura | Porosidade Total (%) |            | Índice de Vazios (%) |            | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) |           |
|---------|----------------------|------------|----------------------|------------|---------------------------------------|-----------|
|         | Ambiente             | 55 °C      | Ambiente             | 55 °C      | Ambiente                              | 55 °C     |
|         | RC0                  | 11,29±0,06 | 11,85±0,16           | 22,33±0,10 | 23,18±0,21                            | 2,20±0,00 |
| RC20    | 10,97±0,15           | 11,28±0,02 | 21,75±0,26           | 22,31±0,11 | 2,20±0,00                             | 2,20±0,01 |
| RC40    | 12,64±0,20           | 12,61±0,15 | 24,30±0,34           | 24,10±0,35 | 2,17±0,00                             | 2,15±0,00 |

A Figura 4.7 e Figura 4.8 permitem uma melhor visualização dos efeitos relativos ao aumento do teor de substituição do cimento na porosidade total e no índice de vazios de amostras contendo o resíduo cerâmico curadas em diferentes temperaturas.

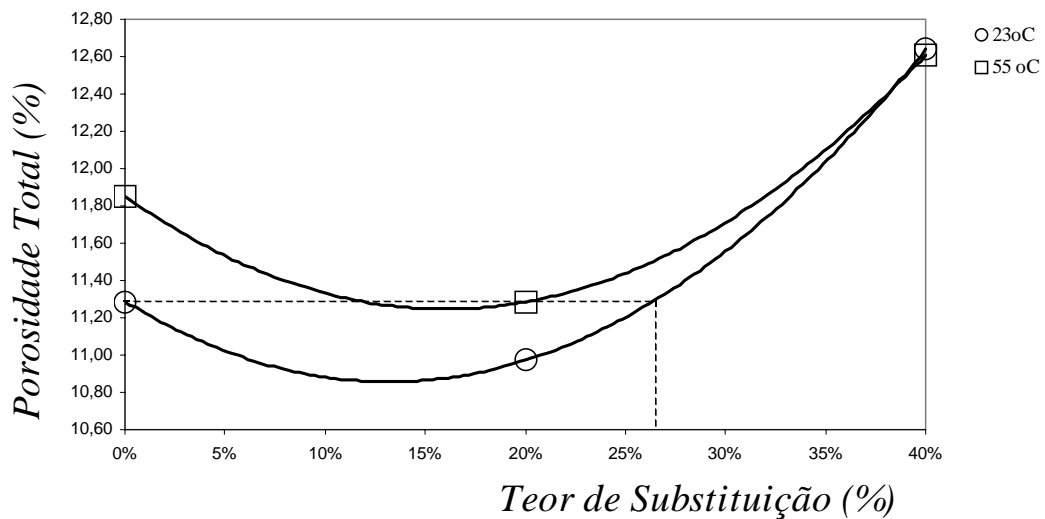
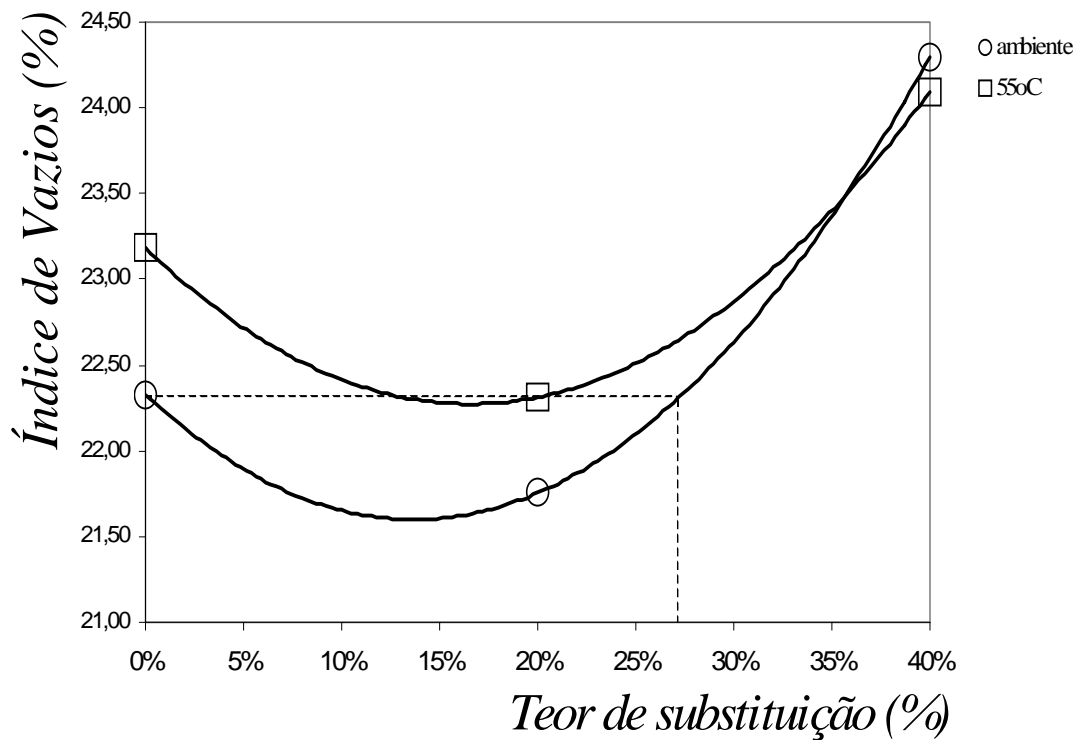


Figura 4.7: Variação da porosidade total com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de argamassas contendo RC.



**Figura 4.8:** Variação do índice de vazios com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de argamassas contendo RC.

Pode ser visto que o aumento da temperatura, objetivando acelerar a cinética das reações pozolânicas, não trouxe benefícios no tocante a porosidade e ao índice de vazios. Isto pode ser explicado por uma maior lixiviação do hidróxido de cálcio pela água do tanque aquecido, a qual não se encontrava saturada por este composto, acarretando, conseqüentemente em um aumento da porosidade em razão dos vazios por ele deixados. De fato, observou-se que os corpos de prova imersos em água aquecida, após secos ao ar, apresentaram um pó de coloração branca em suas superfícies, o que não foi observado para corpos de provas curados em temperatura ambiente (Figura 4.9). Por outro lado, esta lixiviação também reduziu a disponibilidade de CH necessário para a reação pozolânica que, quando ocorre, pode contribuir positivamente para a redução da porosidade.



**Figura 4.9:** Corpos-de-Prova de argamassas contendo resíduo cerâmico curados à temperatura ambiente (grupo da direita na foto menor) e à 55 °C (grupo da esquerda na foto menor e detalhe à direita).

Com relação ao teor de substituição, segundo a tendência observada, pode-se concluir que, tanto a porosidade total quanto o índice de vazios de argamassas contendo o resíduo cerâmico, permaneceriam inferiores ao de controle, sem substituições, independentemente da temperatura, até um teor máximo em torno de 27%, a partir do qual o aumento não mais resultaria em benefícios para estas propriedades. Os resultados também indicam que o teor que proporcionaria um sistema menos poroso seria em torno de 15% para ambas as temperaturas. No entanto, um número maior de pontos experimentais seria necessário para o estabelecimento, com maior precisão, de tal teor de substituição.

### 4.5.3 Absortividade

As Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam as curvas médias do ganho acumulativo de água por área em função da raiz quadrada do tempo para argamassas produzidas com RC curadas à temperatura ambiente e a uma temperatura de 55 °C, respectivamente. Em ambas as figuras, observa-se para todas as misturas utilizadas a ocorrência de dois estágios distintos de absorção

(denominados por A e B), caracterizados pelas diferentes declividades das retas relativas a cada uma das misturas.

Segundo Gonçalves (2005), o primeiro estágio (A) pode ser caracterizado pelo período de absorção. Neste estágio o fluxo de água acontece nos vazios aprisionados (gerados durante a moldagem) e capilares maiores. No segundo estágio (B), chamado de período de saturação, o fluxo de água ocorre em poros capilares menores. Portanto, uma mesma mistura analisada poderá ter taxas de absorção (absortividades, determinadas pelas declividades das retas) distintas para a fase de absorção e saturação, sendo a segunda bem menor que a primeira.

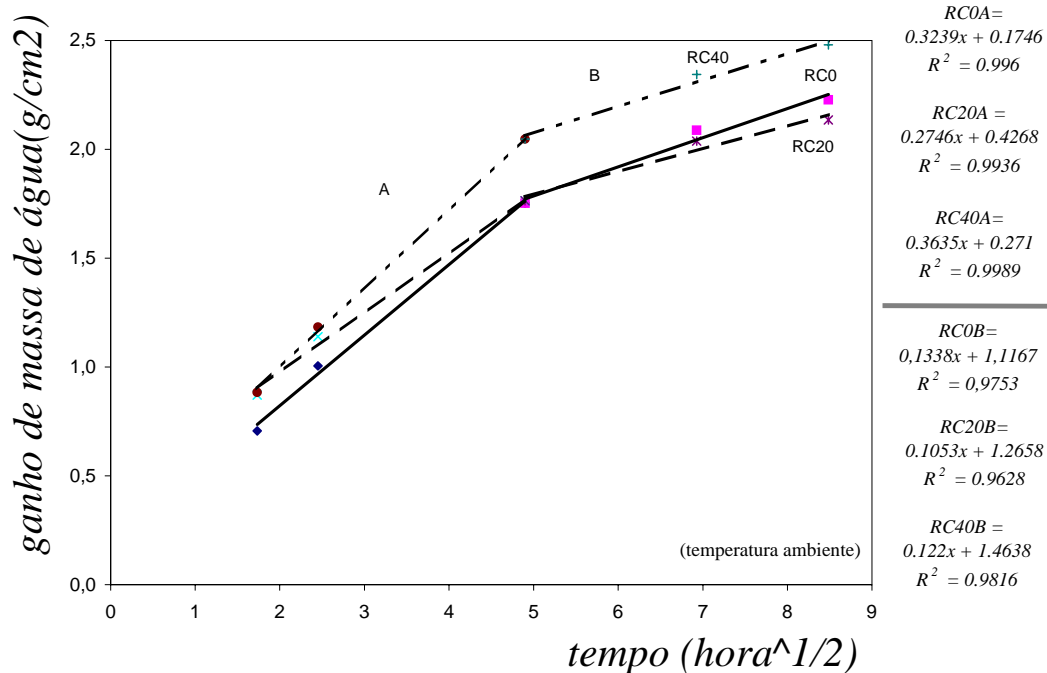


Figura 4.10: Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo, médias para as argamassas curadas à temperatura ambiente.

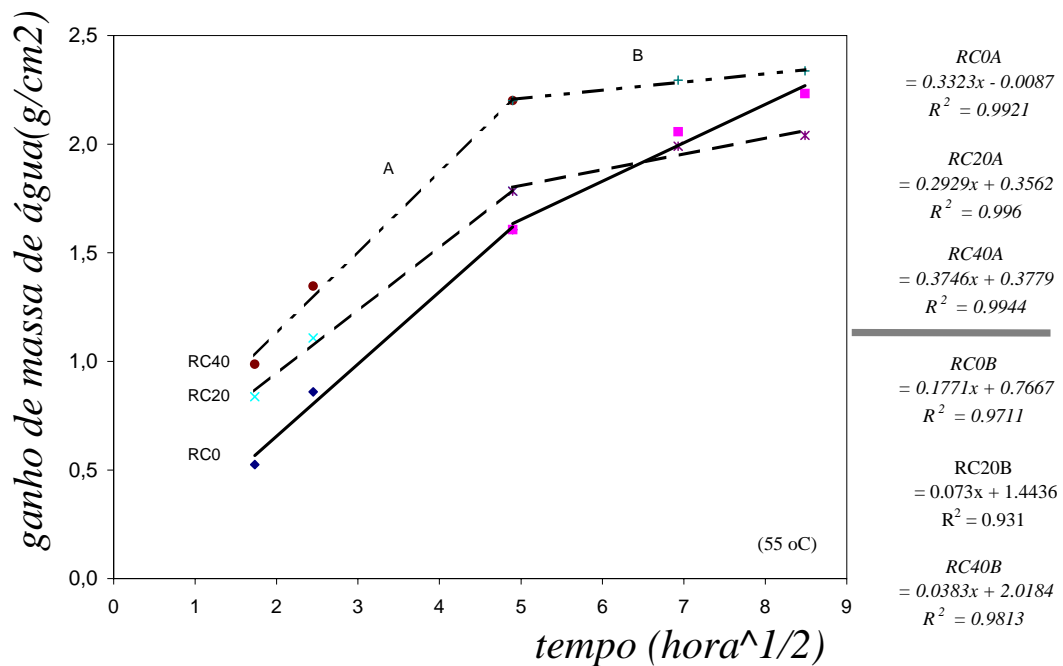


Figura 4.11: Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo, médias para as argamassas curadas à temperatura de 55°C.

A Tabela 4.11 apresenta os valores de absorvidade, utilizando a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados do Excel, obtidos para as argamassas avaliadas segundo a temperatura de cura às quais as mesmas foram submetidas.

Tabela 4.11: Absorvidade das argamassas contendo RC segundo a temperatura de cura.

| Temperatura de Cura | Mistura | Absorvidade (g/cm <sup>3</sup> .h <sup>1/2</sup> ) |           |
|---------------------|---------|--|-----------|
|                     |         | Estágio A  | Estágio B |
| Ambiente            | RC0     | 0,3239   | 0,1338    |
|                     | RC20    | 0,2746   | 0,1053    |
|                     | RC40    | 0,3635   | 0,1220    |
| 55 °C               | RC0     | 0,3323   | 0,1771    |
|                     | RC20    | 0,2929   | 0,0730    |
|                     | RC40    | 0,3746   | 0,0383    |

A variação da absorvidade com os teores de substituição pode ser vista na Figura 4.12 para ambas as temperaturas de cura inicial. Com relação ao Estágio A, observa-se que a variação segue uma tendência similar à variação observada nos ensaios de porosidade total e índice de vazios, onde teores de substituição em torno de 15% também foram considerados como ótimos. No entanto, a mesma tendência não foi observada no Estágio B para amostras curadas na temperatura de 55° C, mas sim na temperatura ambiente. De fato, para este estágio, o aumento do teor reduziu a absorvidade. Esta observação parece confirmar que o efeito da reação pozolânica atua não somente na produção de um sistema microporoso, através do refinamento do tamanho dos poros, mas também aumenta a tortuosidade do referido sistema (METHA & MONTEIRO, 1994). É importante salientar que amostras contendo teores de 40% de substituição do cimento por RC ainda tiveram absorvidade semelhantes ao das amostras de controle, sem substituições.

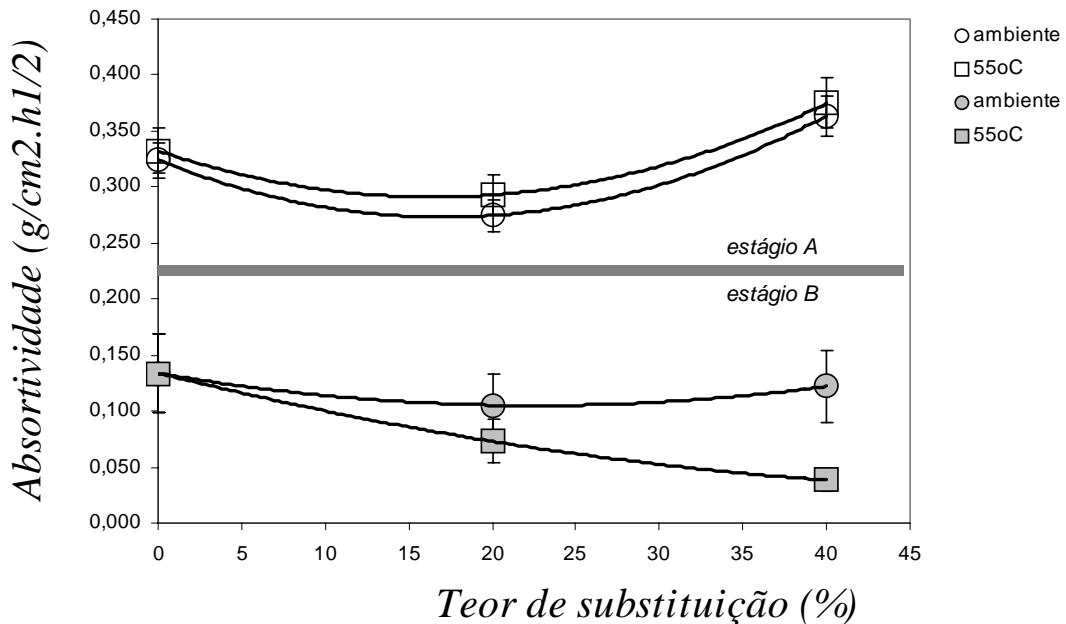


Figura 4.12: Variação da absorvidade com o teor de substituição e temperatura de cura das argamassas contendo RC



## 4.6 Influência do Teor de Substituição Parcial do Cimento e da Temperatura de Cura em Concretos contendo RC

### 4.6.1 Variação da Consistência dos Concretos pela Adição do RC

A variação da consistência de concretos contendo RC com o aumento do teor de substituição, medida pelo abatimento do tronco de cone, pode ser vista na Figura 4.13. Como esperado, quanto maior o teor de substituição do cimento pelo RC (cuja superfície específica igual a  $6039\text{cm}^2/\text{g}$  é uma vez e meia maior do que a do cimento), menor a trabalhabilidade das misturas, ocasionada pela maior demanda de água necessária para envolver os grãos mais finos do RC. A observação do estabelecimento de uma tendência linear confirma os resultados obtidos para as argamassas de traço equivalente a matriz dos concretos aqui ensaiados.

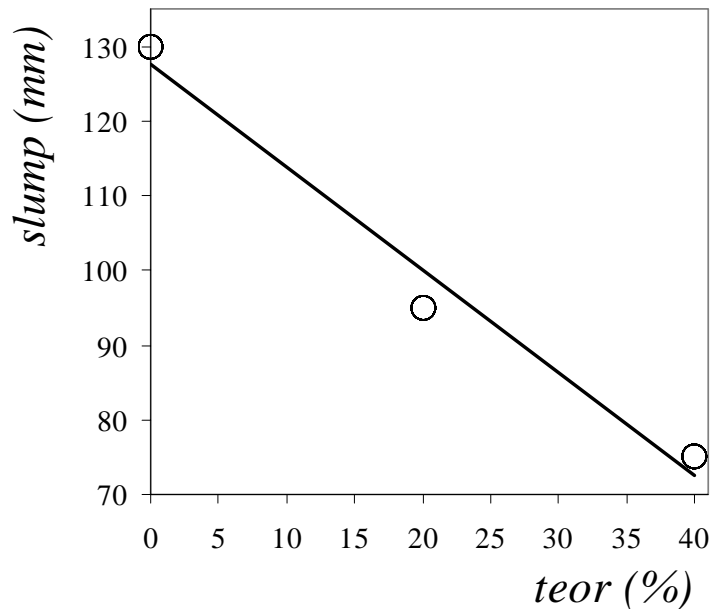
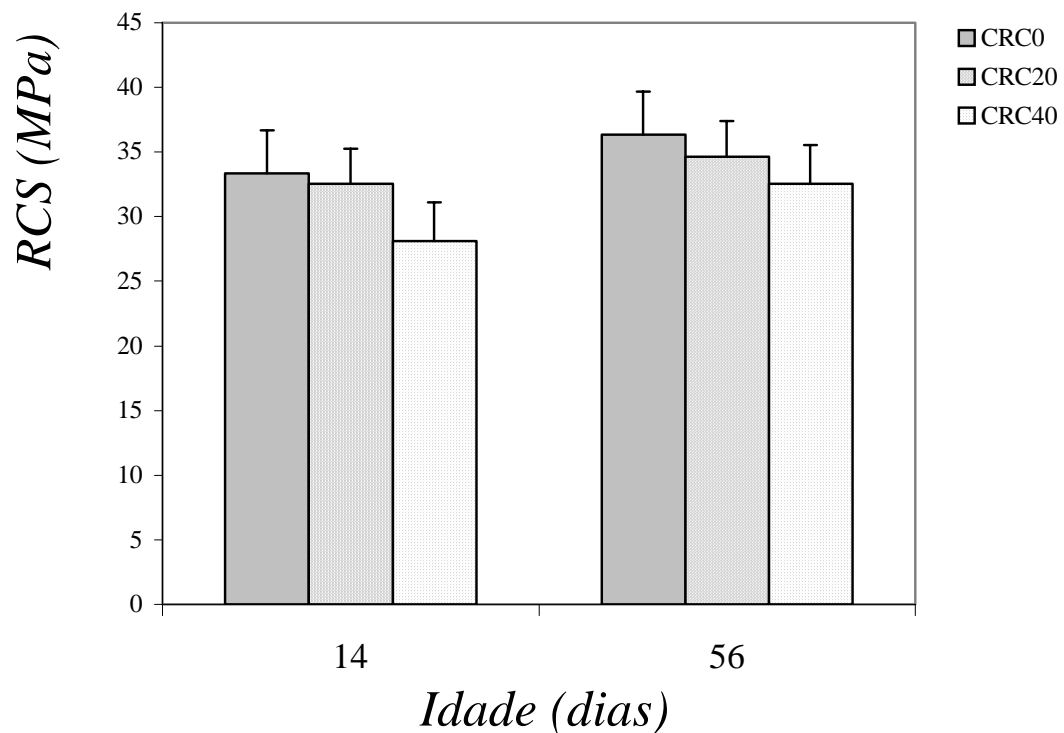


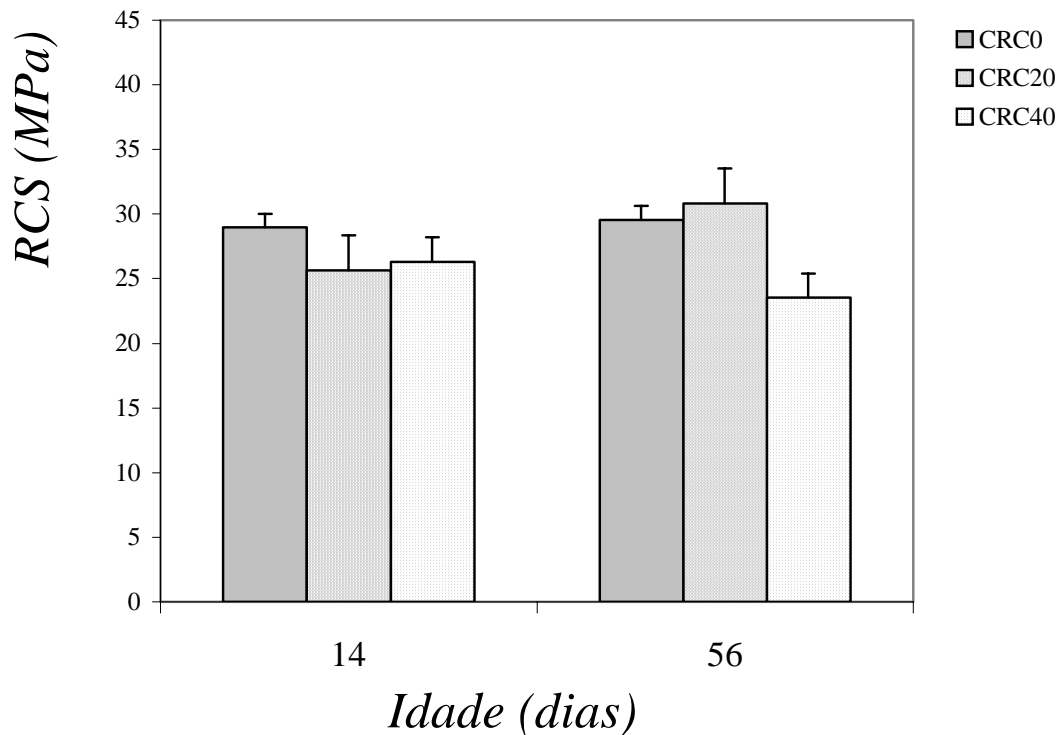
Figura 4.13: Trabalhabilidade de concretos com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico.

#### 4.6.2 Resistência à Compressão Simples dos Concretos Contendo RC

A variação de resistência à compressão simples de concretos com o aumento do teor de substituição do cimento por RC, para as idades de 14 e 56 dias e segundo a temperatura de cura utilizada, podem ser vistas nas Figura 4.14 e Figura 4.15.



**Figura 4.14: Resistência à Compressão Simples (RCS) de concretos contendo resíduo de cerâmica vermelha (CRC) com diferentes teores de substituição do cimento curados à temperatura ambiente.**



**Figura 4.15: Resistência à Compressão Simples (RCS) de concretos contendo resíduo de cerâmica vermelha (CRC) com diferentes teores de substituição do cimento curados a 55°C.**

Observa-se que o aumento do teor de substituição do cimento por RC gerou uma redução na resistência dos concretos curados à temperatura ambiente. Na verdade, esta redução não foi proporcional ao aumento do teor, uma vez que os concretos com teores de substituição iguais a 40% só tiveram suas resistências reduzidas em aproximadamente 11% em relação aos concretos de controle (sem substituição). Esta observação corrobora para o entendimento de que a reação pozolânica entre o resíduo cerâmico e os produtos hidratados do cimento contribuiu para compensar a diluição do cimento.

Nos concretos curados a 55° C, observou-se uma tendência similar para a idade de 14 dias. Contudo, aos 56 dias, concretos com teores de substituição iguais a 20% obtiveram um desempenho médio equivalente aos concretos de referência. As amostras contendo 40% de resíduo cerâmico obtiveram uma redução de apenas 20% em suas resistências. É importante salientar que a cura térmica a 55° C não promoveu um ganho de resistência para

os concretos contendo adição. Ao contrário, observou-se uma redução geral nas resistências, tanto das amostras contendo adição quanto daquelas utilizadas como controle, de cerca de 20% em relação às aquelas curadas à temperatura ambiente. Esta observação parece indicar que, assim como o observado para as argamassas curadas a mesma temperatura, a lixiviação do hidróxido de cálcio durante a cura no tanque aquecido, provocou um aumento da porosidade destes concretos, cujo efeito sobre a resistência dos mesmos predominou sobre os efeitos positivos da utilização do material pozzolânico.

Uma das razões que podem explicar uma redução da resistência à compressão simples com o aumento do teor de substituição do cimento pelo material pozzolânico é o aumento da relação água/cimento ocasionado por esta substituição. De fato, para teores de substituição iguais a 40% de RC, a relação água/cimento foi de 0,83, muito maior do que 0,5 usada no concreto sem substituição, embora a relação água/aglomerante permanecesse aproximadamente a mesma.

Utilizando-se os dados dos consumos de materiais apresentados na Tabela 3.6 do subitem 3.2.8 do Capítulo 3, foram obtidos os valores de  $pz/c$  para as misturas correspondentes. Os valores de  $I_p$  e  $C_{eq}$  (termos cujas definições foram abordadas no Capítulo 2 deste trabalho) para cada uma das misturas utilizadas, foram obtidos, respectivamente, segundo as equações 2.3 e 2.4, apresentadas no subitem 2.2.2, onde o  $IAP_{28}$  utilizado foi igual a 81,4%, obtido para o resíduo cerâmico de superfície específica igual a  $6040 \text{ cm}^2/\text{g}$  conforme a Tabela 4.7. Os valores de  $pz/c$ ,  $C_{eq}$ ,  $a/c$ ,  $a/C_{eq}$  e resistência à compressão simples média aos 56 dias, relativa à cura realizada à temperatura ambiente, das misturas consideradas encontram-se apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Relação pz/c, Ceq, a/c, a/Ceq e resistência à compressão de concretos contendo RC.

| Mistura | $pz/c$ | $C_{eq}$ | $a/c$ | $a/C_{eq}$ | $f_c$ (MPa) |
|---------|--------|----------|-------|------------|-------------|
| CRC0    | 0,0    | 445,0    | 0,50  | 0,50       | 36,4        |
| CRC20   | 0,2    | 450,7    | 0,63  | 0,49       | 34,7        |
| CRC40   | 0,4    | 391,8    | 0,83  | 0,57       | 32,5        |

A Figura 4.16 mostra a distribuição das resistências médias aos 56 dias de idade de concretos, com e sem substituição do cimento por resíduos cerâmicos, em função das relações  $a/c$  e  $a/C_{eq}$  para um teor de substituição de 40%, segundo a Lei de Abrams. As constantes empíricas  $k_1=147$  e  $k_2=0,0779$  utilizadas para a mistura sem adição seguiram o proposto por De Larrard (1999). Para a curva equivalente às misturas contendo 40% de resíduo estas constantes foram calculadas, levando-se em consideração o conceito de cimento equivalente, utilizando-se o método dos mínimos quadrados do Solver do Excel da Microsoft. Os valores obtidos foram  $k_1=147,12$  e  $k_2=0,0701$ .

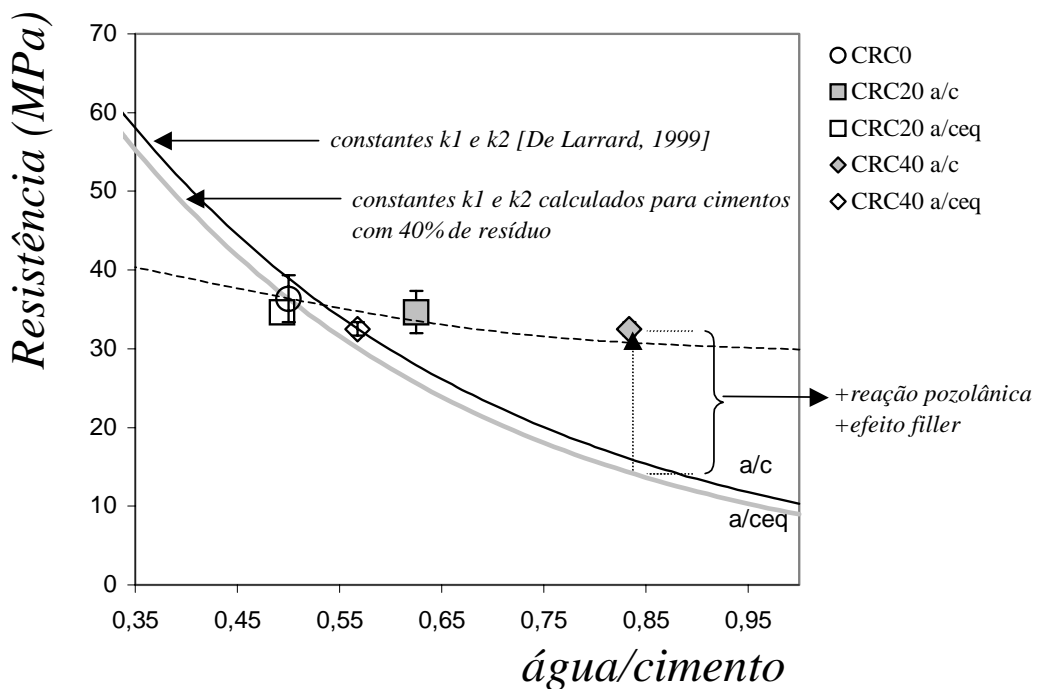


Figura 4.16: Curvas de Abrams de concretos de cimentos com e sem substituição por resíduo cerâmico.

Como pode se observar, a compensação da resistência das amostras contendo RC em substituição parcial do cimento, acarretada pela reação pozolânica destes resíduos, é evidenciada pelo fato de que a distribuição da resistência média à compressão (linha tracejada) não segue a curva de Abrams que caracteriza os cimentos Portland sem adições, onde uma maior relação água/cimento acarretaria uma redução de resistência à compressão conforme indicado (linha cheia superior) nesta figura. Ao contrário, a variação da resistência acompanha a curva de Abrams com as constantes calculadas levando-se em consideração a relação água/cimento equivalente para um cimento contendo o RC (linha cheia inferior).

Do exposto acima, pode-se concluir que a presença do resíduo torna o cimento diferente do cimento Portland sem substituições, não somente pela presença do material como filler, como também pelo potencial pozolânico do mesmo. Desta forma, se faz necessário avaliar os cimentos com substituição como um cimento com propriedades diferentes do cimento de origem, já que a intensidade e o caminho das reações pozolânicas dependerá de fatores como, por exemplo, a composição química e mineralógica da matéria prima de fabricação e os parâmetros associados ao processo de queima da cerâmica vermelha a partir da qual a pozolana foi obtida, além da finura da pozolana utilizada.

### **4.6.3 Absorção dos Concretos Contendo RC**

#### **4.6.3.1 Porosidade Total, Índice de Vazios e Massa Específica**

A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos para porosidade total, índice de vazios e massa específica no estado saturado de concretos contendo 0%, 20% e 40% de substituição do cimento por resíduo cerâmico com superfície específica igual a  $6039 \text{ cm}^2/\text{g}$ , submetidos a duas temperaturas distintas de cura, segundo metodologia especificada no Capítulo 3. Os coeficientes de variação

especificados na referida tabela foram determinados considerando-se 95% de confiabilidade.

Tabela 4.13: Porosidade total, índice de vazios e massa específica de concretos contendo RC de acordo com a temperatura de cura

| Mistura      | Porosidade Total |           | Índice de Vazios |            | Massa Específica     |           |
|--------------|------------------|-----------|------------------|------------|----------------------|-----------|
|              | (% )             |           | (% )             |            | (g/cm <sup>3</sup> ) |           |
|              | Ambiente         | 55 °C     | Ambiente         | 55 °C      | Ambiente             | 55 °C     |
| <b>CRC0</b>  | 5,90±0,16        | 5,55±0,13 | 13,48±0,20       | 12,61±0,22 | 2,42±0,03            | 2,40±0,01 |
| <b>CRC20</b> | 6,09±0,02        | 6,55±0,73 | 13,71±0,08       | 14,63±1,65 | 2,39±0,01            | 2,38±0,01 |
| <b>CRC40</b> | 6,74±0,18        | 6,43±1,52 | 14,92±0,28       | 14,24±3,10 | 2,36±0,01            | 2,36±0,02 |

De acordo com os dados observados pode-se considerar que, embora o aumento do teor de substituição tenha reduzido a massa específica, a variação desta redução não foi significativa para ambas as temperaturas de cura. Na verdade, quando considerado o limite de confiabilidade acima, os extremos das massas unitárias praticamente se igualam.

A Figura 4.17 e Figura 4.18 permitem uma melhor visualização dos efeitos relativos ao aumento do teor de substituição do cimento por RC na porosidade total e no índice de vazios de amostras de concreto curadas em diferentes temperaturas.

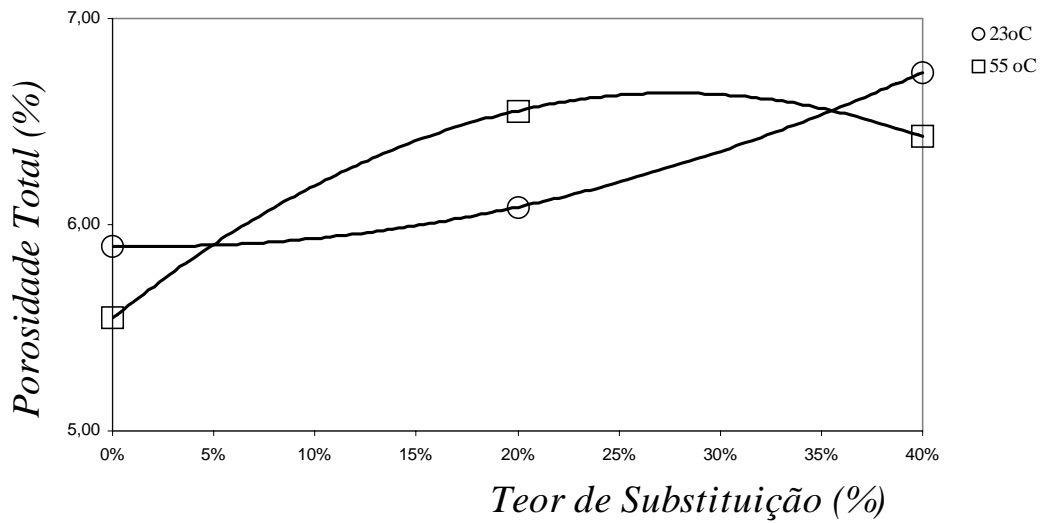


Figura 4.17: Variação da porosidade total com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de concretos contendo RC

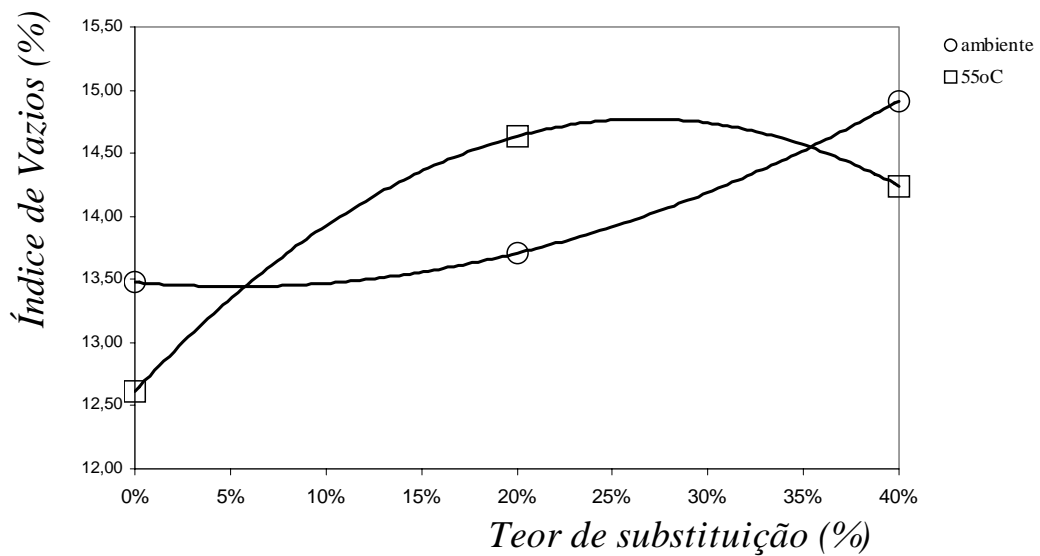


Figura 4.18: Variação do índice de vazios com o teor de substituição do cimento e temperatura de cura de concretos contendo RC

Pode ser visto que o aumento do teor de RC repercutiu em um aumento tanto do índice de vazios quanto da porosidade total das amostras. As tendências aqui observadas parecem então diferir daquelas observadas para as



argamassas, no item 4.5.2, principalmente para os concretos curados a 55°C. Conseqüentemente, um teor ótimo entre 15% e 20% como detectado nos estudos como argamassas não pode ser aqui confirmado. Acredita-se que esta aparente divergência esteja associada à quantidade de cimento por unidade de volume diferente em argamassas e concretos, sendo muito maiores nas primeiras. Certamente, o efeito das substituições pozolânicas se fará bem mais sensível em misturas contendo maior quantidade de cimento, haja vista que a reação pozolânica se dá entre a pozolana e os produtos de hidratação do clínquer.

Embora os resultados de resistência à compressão simples obtidos para estes concretos também indiquem uma redução desta resistência com o aumento do teor de substituição, é importante salientar que concretos contendo 20% de RC em substituição ao cimento, considerando a cura em temperatura ambiente e a idade de 56 dias, apresentaram resistência de cerca de 95% daquela obtida para o concreto de controle (sem substituições).

#### 4.6.3.2 Absortividade

A Figura 4.19 e Figura 4.20 apresentam as curvas médias do ganho acumulativo de água por área em função da raiz quadrada do tempo para concretos produzidos com RC, curados à temperatura ambiente e a uma temperatura de 55 °C, respectivamente.

A Tabela 4.11 apresenta os valores de absortividade, obtidos para os concretos avaliados utilizando-se a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados do Excel, segundo a temperatura de cura às quais os mesmos foram submetidos.

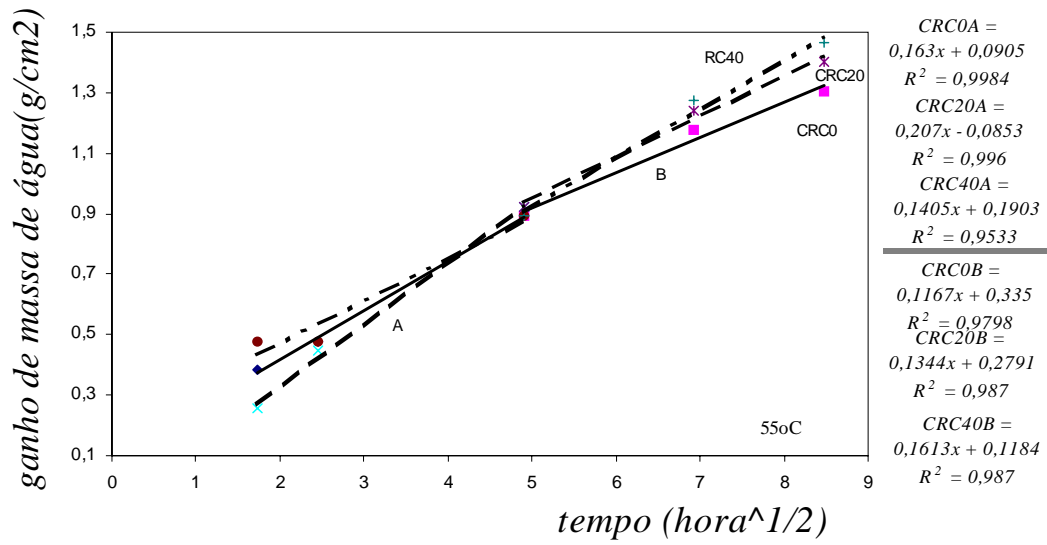


Figura 4.19: Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo: médias para os concretos curados à temperatura ambiente.

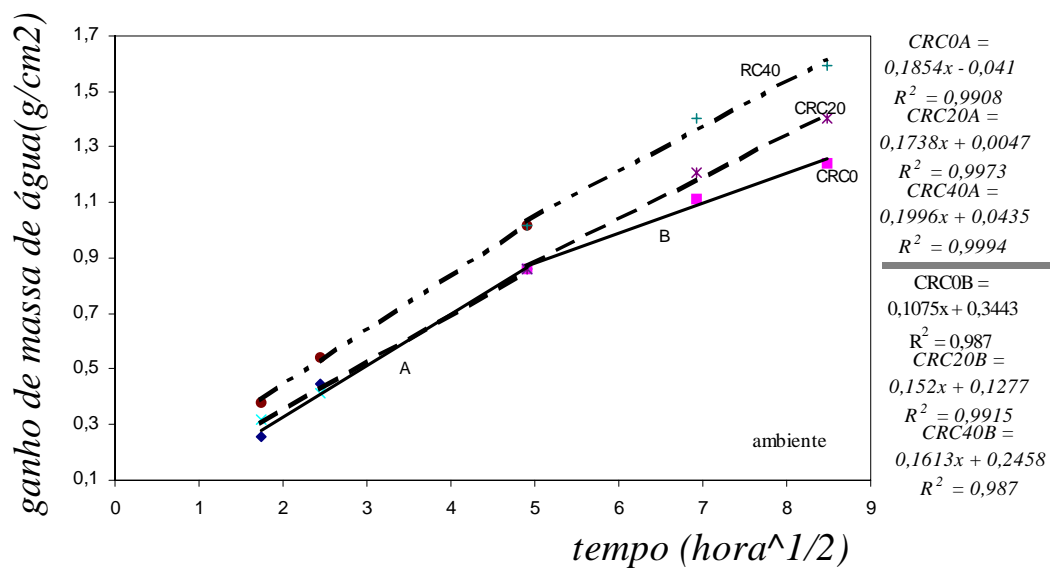


Figura 4.20: Ganho acumulativo de massa de água em função da raiz quadrada do tempo: médias para os concretos curados à 55 °C

Tabela 4.14: Absortividade dos concretos contendo RC segundo a temperatura de cura.

| Temperatura<br>de Cura | Mistura | Absortividade ( $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{1/2}$ ) |           |
|------------------------|---------|---|-----------|
|                        |         | Estágio A   | Estágio B |
| Ambiente               | CRC0    | 0,163   | 0,117     |
|                        | CRC20   | 0,207   | 0,134     |
|                        | CRC40   | 0,141   | 0,161     |
| 55 °C                  | CRC0    | 0,185   | 0,107     |
|                        | CRC20   | 0,174   | 0,152     |
|                        | CRC40   | 0,200   | 0,161     |

A variação das absortividades nos estágios A e B com o teor de substituição de concretos contendo resíduo cerâmico podem ser vistas na Figura 4.21 e Figura 4.22, respectivamente.

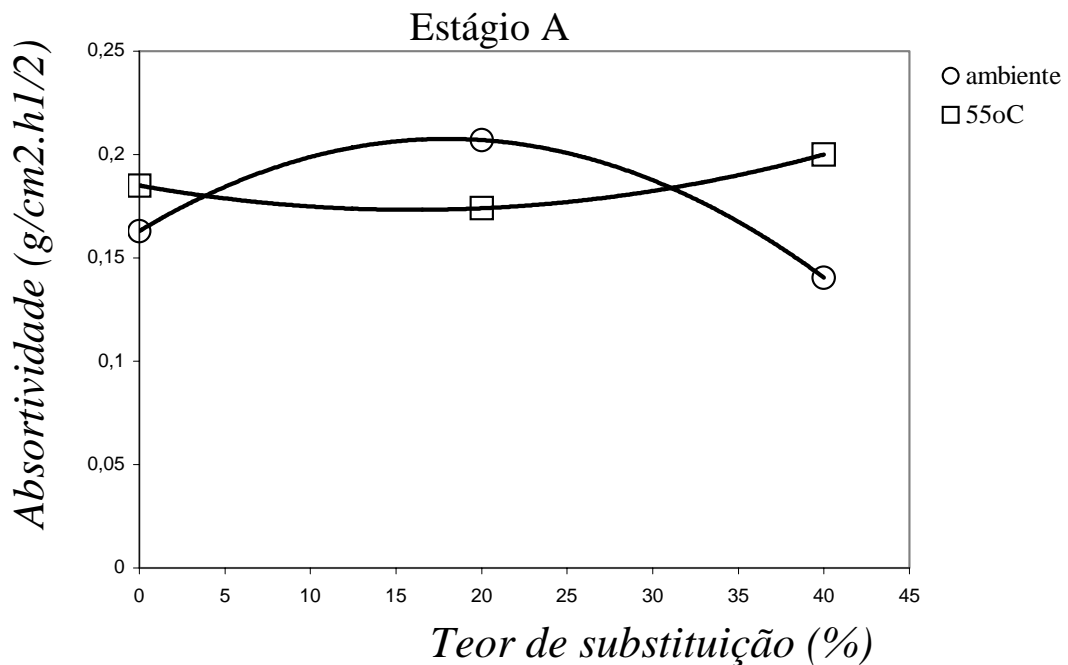
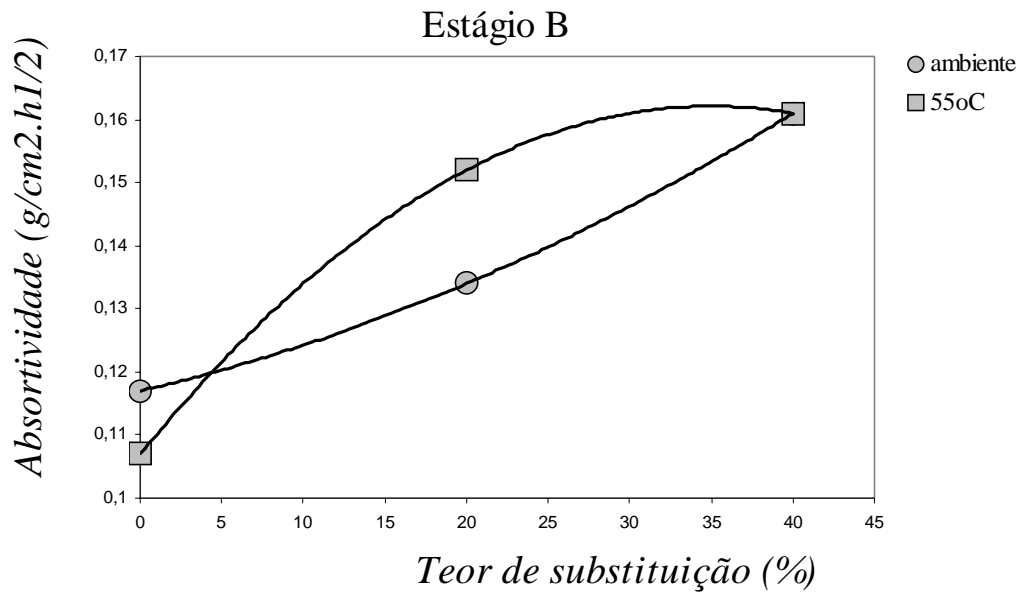


Figura 4.21: Variação da absortividade com o teor de substituição e temperatura de cura de concretos contendo RC: Estágio A.



**Figura 4.22: Variação da absorvidade com o teor de substituição e temperatura de cura de concretos contendo RC: Estágio B.**

Pode ser observado para os concretos analisados que, com relação ao comportamento das curvas no Estágio A, apenas aquela referente à temperatura de cura de 55°C parece concordar com as tendências obtidas no estudo com argamassas, que sugerem a existência de um teor ótimo de substituição, em torno de 20%, para o qual a absorvidade tende a ser menor do que o concreto de controle, com 0% de substituição. Entretanto, esta observação não pôde ser confirmada para os concretos curados à temperatura ambiente, nos quais, contrariamente, uma maior absorvidade foi obtida para o teor de substituição de 20%. Com relação ao estágio B dos concretos, para ambas as temperaturas de cura, observou-se que o aumento do teor de substituição acarretou necessariamente em um aumento da absorvidade, inversamente ao verificado nas argamassas para o mesmo estágio.

Na verdade, visto que as medidas de absorvidade referem-se ao ganho de massa ocasionado pela difusão de água no sistema poroso ao longo do tempo, e que as argamassas da matriz dos concretos têm a mesma composição e proporções das argamassas estudadas anteriormente, era esperado que esta difusão

ocorresse de modo semelhante nestes. Acredita-se que a presença do agregado graúdo pode ter ocasionado algum efeito mais complexo na microestrutura. Uma dissipação menos homogênea do calor de hidratação do cimento na zona de transição pasta-agregado, induzindo a formação de microfissuras seria uma possibilidade a ser considerada.

## **4.7 Influência do teor de substituição do cimento pelo resíduo em parâmetros relacionados à corrosão das armaduras de concretos submetidos ao ataque de cloretos**

### **4.7.1 Avaliação do pH da Solução de Imersão**

A fim de um melhor entendimento acerca dos efeitos relativos à substituição do cimento por RC na corrosão de armaduras de concretos contendo estes resíduos, avaliou-se o pH das soluções com e sem NaCl, onde foram imersos os corpos de prova de concreto avaliados, conforme metodologia apresentada no subitem 3.2.10 do Capítulo 3. Uma das razões pela qual escolheu-se o NaCl foi a sua grande solubilidade em água sem alterar o pH do sistema NaCl-H<sub>2</sub>O (GLASSER, 1992). Desta maneira, as variações do pH estarão associadas principalmente às difusões dos íons originários da dissolução do hidróxido de cálcio e dos álcalis do cimento (daí poder se avaliar o efeito das substituições), além da dissolução do gás carbônico atmosférico na solução de imersão.

A Figura 4.23 e a Figura 4.24, respectivamente, mostram a variação do pH com o teor de RC e o tempo de imersão em água e solução salina de NaCl a 3,5%.

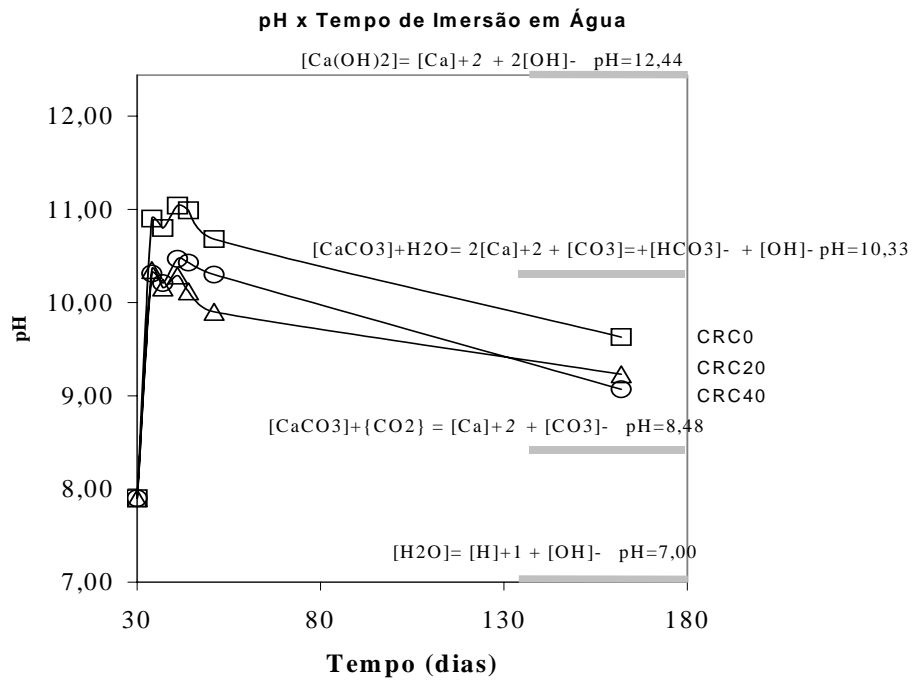


Figura 4.23: Variação com tempo do pH da água contendo concretos com diferente teores de resíduo cerâmico.

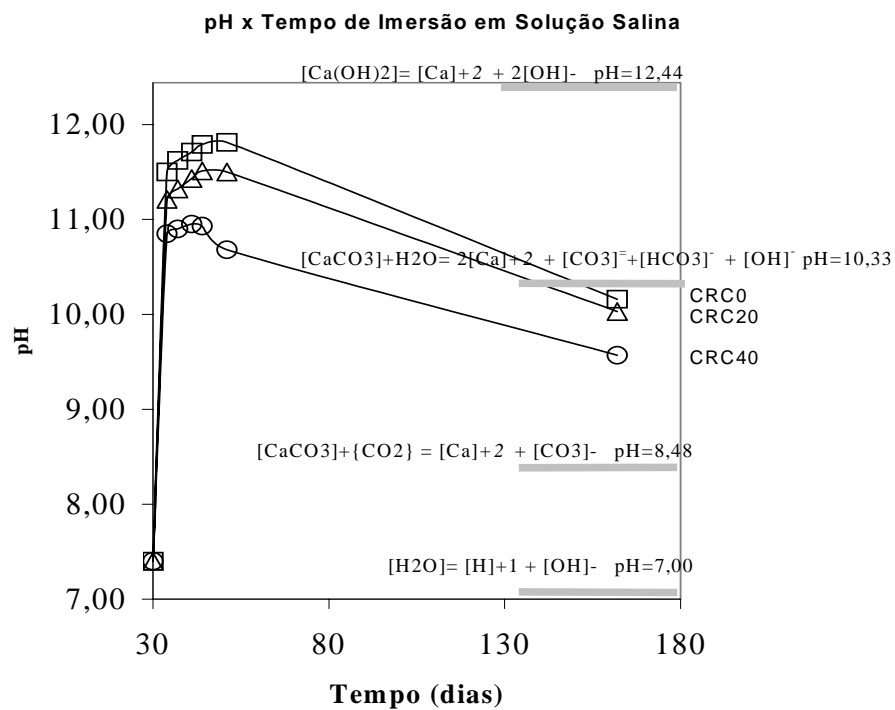


Figura 4.24: Variação com tempo do pH da solução salina (NaCl) contendo concretos com diferente teores de resíduo cerâmico.

Nota-se que a variação do pH atingiu maiores valores na solução salina. Soluções com e sem NaCl contendo amostras de concreto sem substituições também tiveram seus pHs maiores do que aquelas contendo concretos com resíduo cerâmico.

É possível observar nestas figuras que a variação do pH com o tempo tende a seguir aos estados de equilíbrio iônico, apresentados na Tabela 2.2 e Figura 2.4.

Tabela 4.15: Equações Químicas no equilíbrio e seus respectivos pHs (Torres, 2004).

| Legenda | Equilíbrio químico   | pH no equilíbrio |
|---------|--|------------------|
| A       | $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} (0.1\text{M})$  | 12,90            |
| B       | $\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$   | 12,44            |
| C       | $2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{1-} + \text{OH}^-$ | 10,33            |
| D       | $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^{1-} + \text{OH}^-$                      | 8,48             |

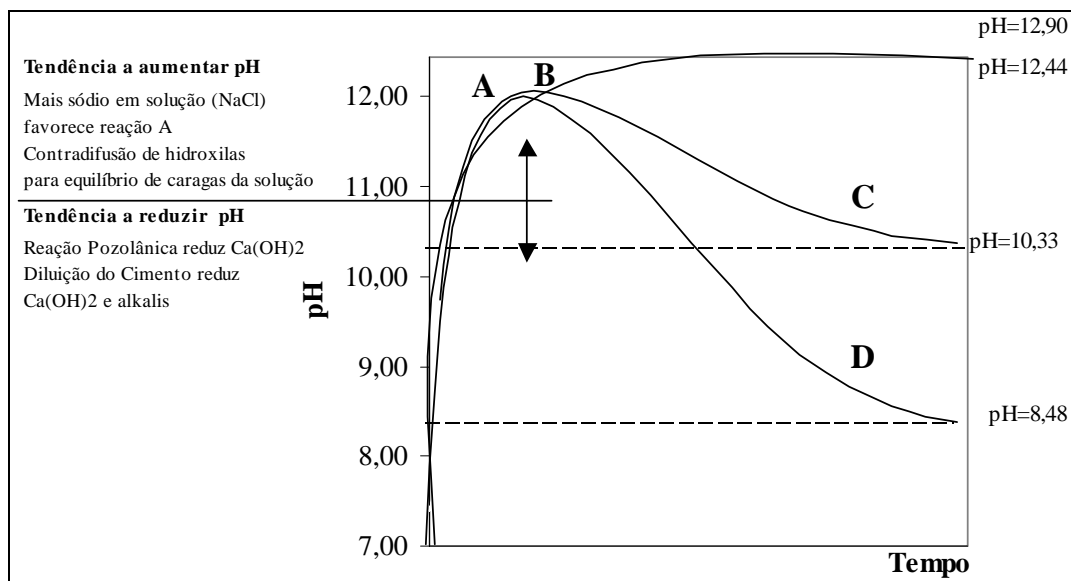


Figura 4.25: Variação esquemática do pH em soluções e os equilíbrios iônicos das reações da tabela 4.15.

Conforme discutido anteriormente, no Capítulo 2, os equilíbrios A e B, provocados pela lixiviação do hidróxido de cálcio (CH) e dos álcalis do cimento, forçam o pH das soluções para valores em torno de 12,50. É possível notar que tanto a diluição do cimento quanto a reação pozolânica, devido ao aumento da substituição do cimento por RC, interferem na cinética deste aumento de pH provocado pelo equilíbrio A e B, pois ambas reduzem a oferta de CH.

Embora esta tendência de aumento inicial do pH tenha ocorrido em ambas as soluções com e sem NaCl, este aumento, porém, foi mais intenso na segunda solução. Tal tendência pode ser atribuída à difusão dos íons cloreto para o interior do concreto que acarreta uma maior lixiviação de CH, particularmente de hidroxilas (contradifusão), ocasionada pelo incremento da concentração de  $\text{Na}^+$  em solução, que difunde muito pouco em cimento (TORRES, 2004). Este efeito poderá ser mais ou menos intenso dependendo da disponibilidade de hidróxido de cálcio (menor com a diluição do cimento e com a reação pozolânica) e da formação de compostos contendo cloro, tais como os sais de Friedel. Deste modo, o excesso de  $\text{Na}^+$  oriundo da dissolução do NaCl tende a se equilibrar com as hidroxilas lixiviadas, aumentando o pH da solução.

Ao longo do tempo, observa-se uma tendência à redução do pH, caminhando para o equilíbrio dos carbonatos em torno de 8,48 em razão da disponibilidade de  $\text{CO}_2$  atmosférico, sendo esta tendência mais evidente tanto em água quanto em solução salina para o teor de 40%.

Acredita-se que as fontes de carbonato atuantes na variação do pH das soluções analisadas podem ter sido o  $\text{CO}_2$  atmosférico, a calcita do RC e o filler calcário pré-introduzido durante a fabricação do cimento utilizado no presente estudo (CPIIF-32).

O resíduo cerâmico, portanto, aparenta atuar na alcalinidade das soluções pelo menos de duas maneiras: reduzindo a quantidade de cimento, e, portanto, a quantidade de produtos solúveis como o CH; consumindo o CH e produzindo C-S-H e outros calcio-aluminatos, formando uma matriz menos



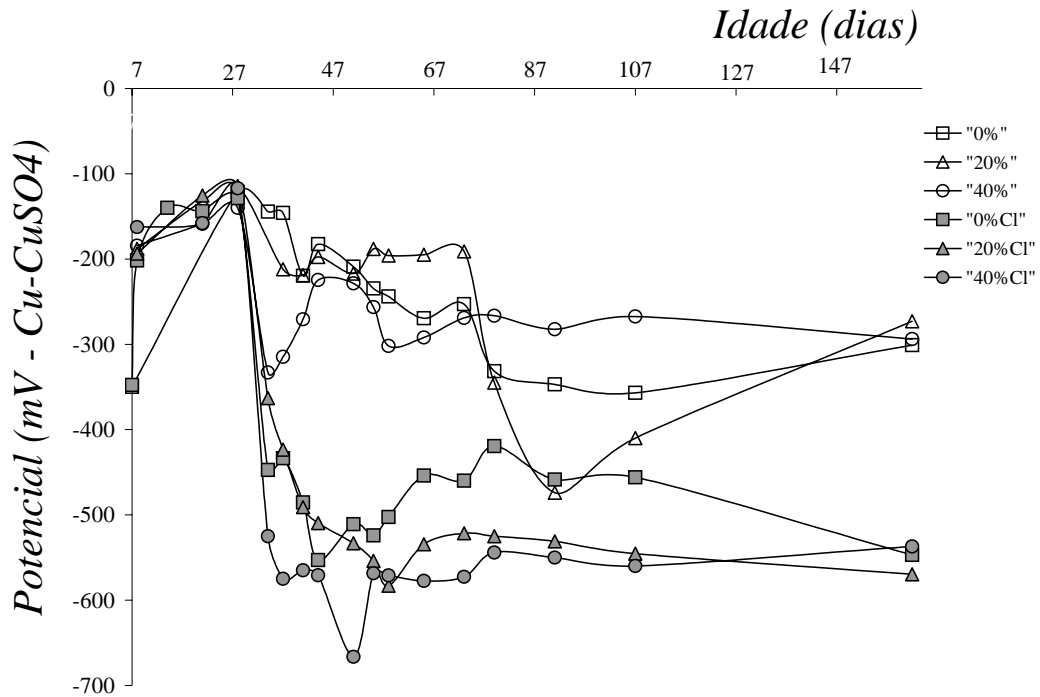
permeável. No entanto, estas observações devem levar em consideração que uma diluição excessiva do cimento em função do teor de substituição utilizado pode prevalecer sobre a reação pozolânica, contribuindo para o empobrecimento da matriz.

Outro aspecto importante a ser considerado é que o consumo do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica dos resíduos cerâmicos pode também tornar os poros da matriz menos alcalinos, o que poderia colaborar para o aumento da probabilidade de corrosão de armaduras envolvidas por concretos contendo este tipo de adição. Também é importante ressaltar que o pH no poro tende a ser maior do que os valores encontrados nas soluções, dada a formação de filmes impeditivos da difusão de íons, na superfície das matrizes, devido à precipitação de carbonatos como ocorre, por exemplo, com a calcita e a aragonita em água marinha (BUENFELD, 1986).

#### **4.7.2 Avaliação do Potencial e Corrente de Corrosão**

A fim de investigar o efeito da substituição do cimento por resíduos cerâmicos na probabilidade de corrosão de concretos contendo esta adição, avaliou-se o potencial e a corrente de corrosão, ao longo do tempo, das armaduras envoltas pelas matrizes dos referidos concretos quando submetidos à imersão em água e solução salina de NaCl a 3,5%.

A Figura 4.26 apresenta a variação do potencial de corrosão com a idade em função do teor de substituição do cimento por RC de amostras de concreto imersas em água e em solução salina. A idade nela indicada é relativa ao tempo de moldagem das amostras e os valores apresentados são referentes a uma média dos resultados obtidos para cada grupo de três corpos-de-prova.



**Figura 4.26:** Variação do potencial de corrosão com o tempo em função do teor de substituição do cimento por RC: (amostras imersas em solução salina): símbolos fechados; (amostras imersas em água): símbolos abertos.

Uma vez que as medidas de potencial são fortemente influenciadas pelo teor de umidade das amostras, para uma correta interpretação dos valores apresentados na referida figura, é importante considerar os períodos distintos das condições de exposição às quais as amostras ensaiadas se encontravam submetidas no decorrer do tempo. A Tabela 4.16 apresenta os períodos relativos a cada uma destas condições.

**Tabela 4.16:** Períodos distintos de condições de exposição das amostras utilizadas nos ensaios de medidas eletroquímicas.

| Período | <i>início</i><br>(dias) | <i>fim</i><br>(dias) | <i>condição de exposição</i>               |
|---------|-------------------------|----------------------|--|
| A       | 1                       | 7                    | imersão em água (cura úmida)               |
| B       | 7                       | 28                   | cura ao ar em ambiente de laboratório      |
| C       | 28                      | 162                  | 50% das amostras imersas em água           |
|         |                         |                      | 50% das amostras imersas em solução salina |

Na Figura 4.26 os valores de potencial referentes a idade inicial da avaliação (7 dias) foram obtidos mediante a realização de medidas eletroquímicas nas amostras saturadas, imediatamente após concluído o período de cura úmida, conforme a Tabela 4.16. Com o decorrer do período compreendido entre as idades de 7 e 28 dias, observa-se que estes potenciais tendem a se tornar menos eletronegativos, independentemente do teor de substituição, fato este atribuído à redução de umidade das amostras ao longo do referido período, em razão de sua condição de exposição ao ar.

A partir dos 28 dias de idade, quando da imersão de iguais percentuais das amostras em água e em solução salina, observa-se, de um modo geral e em um curto período de tempo (cerca de 6 dias após a imersão), uma redução destes potenciais para valores mais eletronegativos. Nas amostras imersas em água, esta redução aparenta estar associada apenas à variação de umidade das mesmas, haja vista que as mesmas, ao retornarem à condição de saturação das medidas iniciais, efetuadas aos 7 dias, obtiveram valores de potencial semelhantes aqueles obtidos naquela data. No entanto, o mesmo não se pode afirmar para os valores de potencial referentes às amostras imersas em solução salina, onde esta redução ocorre de modo muito mais acentuado, evidenciando uma forte influência da presença dos íons cloreto nas medidas eletroquímicas efetuadas, além daquela atribuída à variação de umidade.

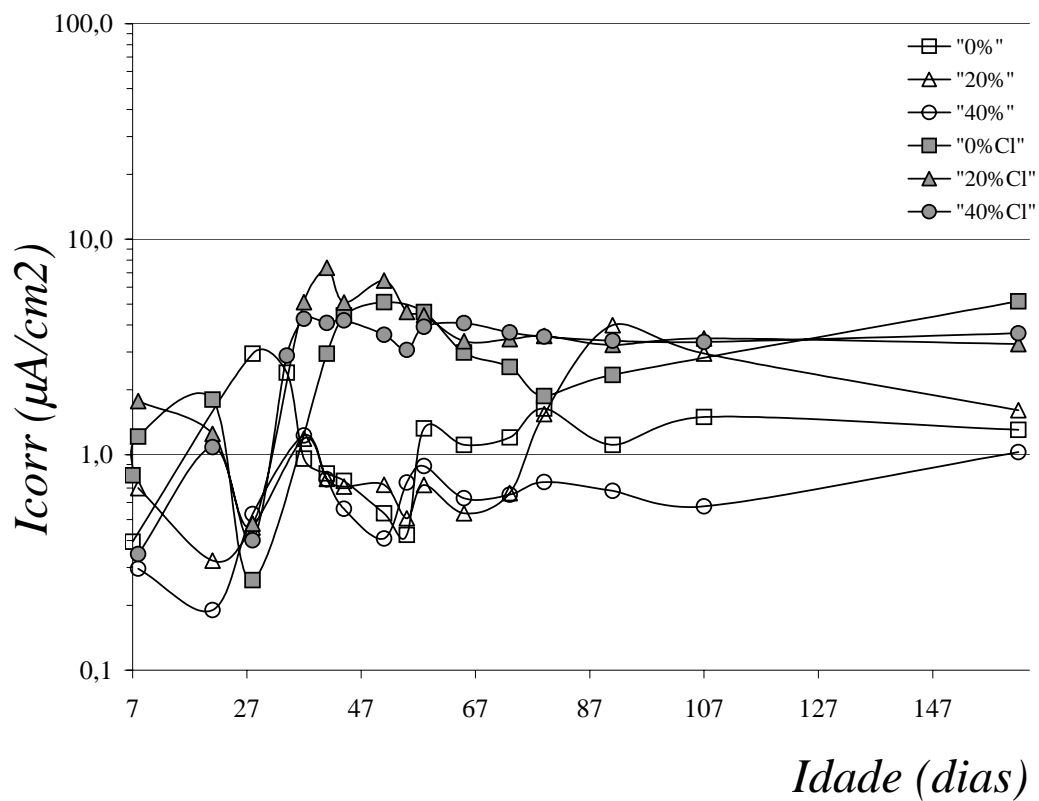
As demais medidas de potencial efetuadas ao longo do tempo confirmam estas tendências iniciais, haja vista que os potenciais relativos às amostras imersas em cloreto permanecem sempre inferiores àqueles relativos as amostras imersas em água.

Com relação ao teor de substituição, inicialmente (durante um período que parece se estender até a idade de cerca 65 dias) se percebem algumas diferenciações nos valores observados para as mesmas condições de exposição, aparentando indicar um pior desempenho das amostras contendo 40% de resíduo cerâmico, atribuído à obtenção de menores valores de potencial para essas amostras. No entanto, ao longo do tempo o que se observa é uma tendência de

comportamento semelhante das amostras com diferentes teores de substituição, em relação aos valores de potencial obtidos, principalmente para a última idade avaliada (162 dias), o que pode ser indicativo de uma possível estabilização das reações pozolânicas.

Conforme a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, os critérios de avaliação para as medidas de potencial são aqueles propostos pela ASTM C-876 (conforme a Tabela 2.3 apresentada no referido capítulo), os quais, embora muito questionados pelo meio técnico-científico, são internacionalmente empregados. Segundo estes critérios e de acordo com os valores obtidos na última idade avaliada, em torno de  $-300\text{mV}$  para as amostras imersas em água e  $-550\text{mV}$  para as amostras imersas em solução salina, a probabilidade de corrosão das primeiras ainda seria incerta, neste momento, enquanto que para as últimas esta probabilidade seria de 95%.

A Figura 4.27 apresenta a variação da taxa de corrosão com a idade em função do teor de substituição do cimento por RC de amostras de concreto. Assim como na figura relativa aos potenciais de corrosão a idade nela indicada é relativa ao tempo de moldagem das amostras e os valores apresentados são referentes à média dos resultados obtidos para cada grupo de três corpos-de-prova. As condições de exposição das amostras também seguem o apresentado na Tabela 4.16.



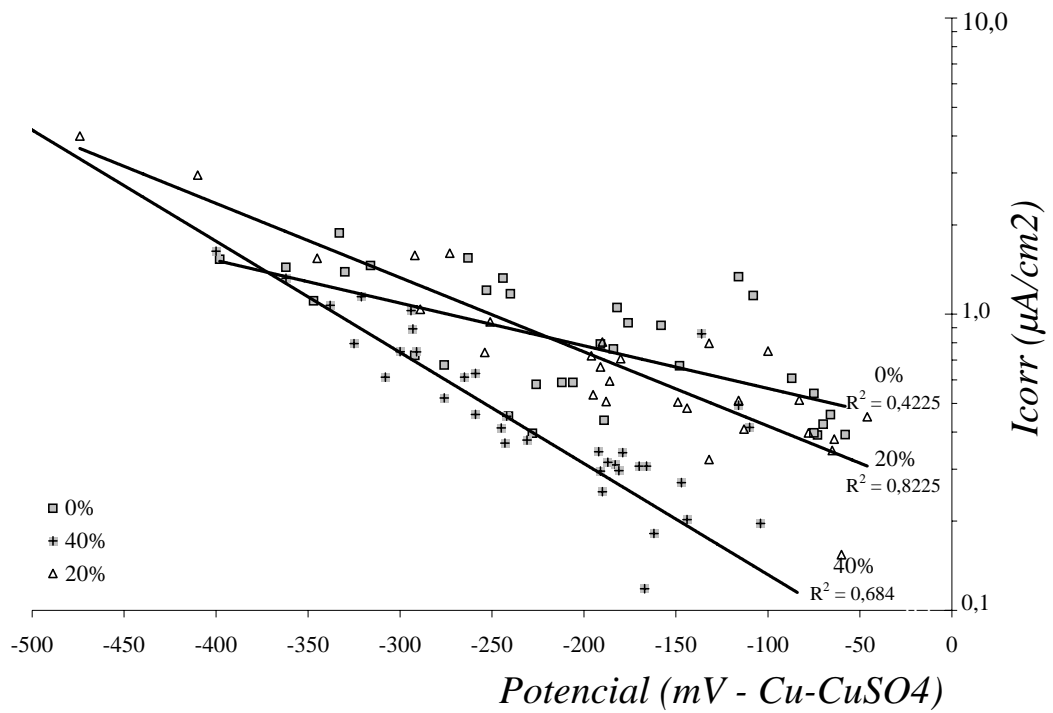
**Figura 4.27: Variação da taxa de corrente de corrosão com o tempo em função do teor de substituição do cimento por RC: (amostras imersas em solução salina): símbolos fechados; (amostras imersas em água): símbolos abertos.**

Do mesmo modo que no observado para os valores de potenciais, percebe-se também para os valores de corrente de corrosão a influência negativa da presença dos íons cloretos nas amostras submetidas à imersão em solução salina, caracterizada pela obtenção de maiores taxas de corrente de corrosão em relação às amostras imersas em água. Com relação ao teor de substituição, a tendência de comportamento observada ao longo do tempo para as correntes de corrosão também aparenta concordar com aquela apresentada pelos potenciais de corrosão onde, respeitadas as condições de exposição, não se percebe variação substancial dos valores de corrente com a variação do teor de substituição, principalmente na última idade avaliada.

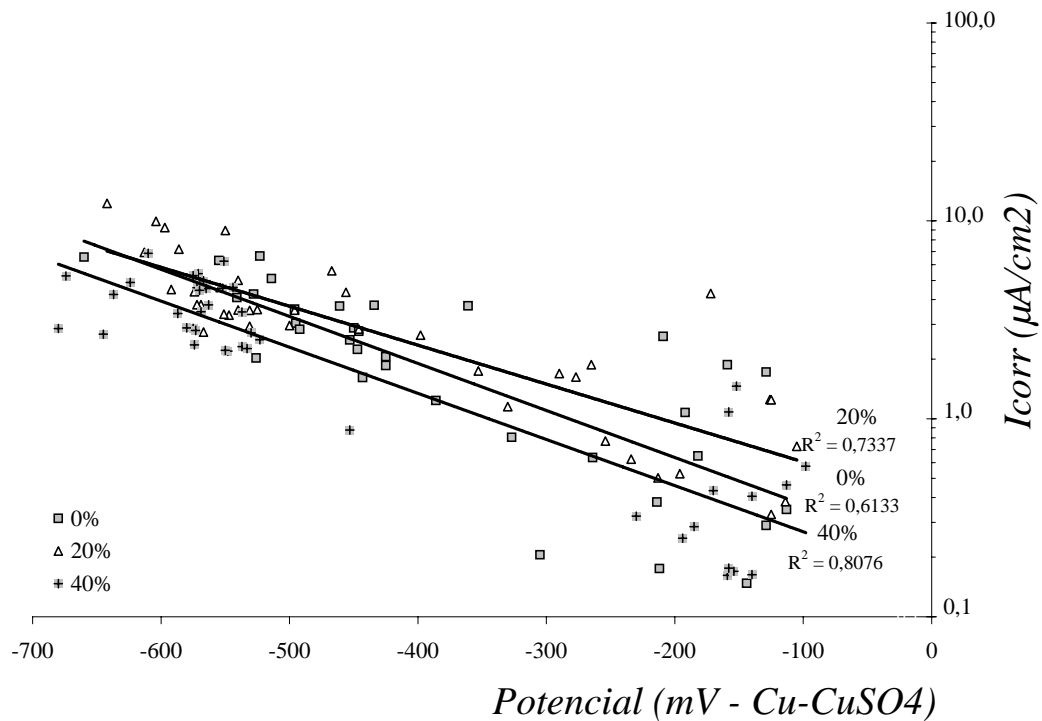
Ainda com relação aos valores referentes às taxas de corrente de corrosão obtidos neste estudo, é importante destacar que os altos valores observados todo o decorrer do experimento, tanto para as amostras imersas em

água quanto para as amostras imersas em solução salina, parecem muito superiores aos apresentados pela literatura em estudos semelhantes (SAKR, 2005; MIRANDA *et al.*, 2005). Estas discrepâncias podem estar relacionadas à falhas tanto na interface aço-concreto quanto no isolamento das barras utilizadas para as medidas, ou ainda a fissuras nos corpos-de-prova. Deste modo, percebe-se necessária a realização de estudos posteriores objetivando um maior aprofundamento desta discussão.

A Figura 4.28 e Figura 4.29 apresentam a relação entre os valores de potencial e taxa de corrente de corrosão obtidos para amostras contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC, submetidas a imersão em água e em solução salina, respectivamente. Verifica-se, em ambas as figuras, que todas as tendências apresentaram comportamento semelhante, onde uma redução dos valores relativos ao potencial de corrosão implica em um aumento da corrente de corrosão. Pode-se observar ainda que os valores relativos às amostras imersas em solução salina obtiveram melhores correlações quando comparados aqueles referentes às amostras imersas em água. Entretanto, em se tratando de medidas eletroquímicas, onde a variação de resultados é bastante considerável, dada a grande quantidade de fatores capazes de influenciá-los, de um modo geral as correlações obtidas podem ser consideradas satisfatórias. A menor correlação entre os valores referentes às amostras com 0% de RC imersas em água, quando comparada às demais obtidas, merece uma melhor avaliação.



**Figura 4.28:** Relação entre os valores de potencial e taxa de corrente de corrosão obtidos para amostras contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC submetidas a imersão em água.



**Figura 4.29:** Relação entre os valores de potencial e taxa de corrente de corrosão obtidos para amostras contendo diferentes teores de substituição do cimento por RC submetidas a imersão em solução salina.

O desempenho de concretos contendo resíduos cerâmicos, no tocante ao transporte de íons cloreto, foi investigado por GONÇALVES (2005). No referido trabalho, sugere-se que o resíduo cerâmico atua positivamente, reduzindo a taxa de difusão de cloro em até aproximadamente 5 (cinco) vezes quando comparado com concretos de controle, sem substituições. Esta sugestão baseou-se em medidas de corrente provocadas pela migração destes íons por um disco de concreto de certa espessura e sob uma dada diferença de potencial.

Certamente, a presença do alumínio, em sua forma amorfa, nos resíduos cerâmicos favoreceria a combinação destes íons com o cloreto, através da formação de uma serie de sais contendo alumina tais como o de Friedel e de Kuzel (GLASSER, 1999), reduzindo assim tal densidade de corrente de difusão. 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 (10,00), 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.

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 a corrosão bastante complexa. Se por um lado, a reação pozolânica promovida pelo RC 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.

No entanto, as medidas eletroquímicas também aparentam concordar com outros ensaios em argamassas e concretos que sugerem um teor ótimo de



substituição entre 15 e 20%, cujos desempenhos aproximam-se daqueles observados nas amostras de controle, sem substituição, mesmo em ambientes mais agressivos tais com o salino. É importante exaltar que avaliações mais abrangentes do papel do resíduo cerâmico na durabilidade dos concretos devem também acessar o desempenho de misturas imersas em longo prazo, onde tanto as reações pozolânicas quanto o efeito dos íons cloreto tornar-se-ão mais evidentes.

## *Capítulo 5 – Conclusões*

---

No presente trabalho, investigou-se o potencial de uso de resíduos cerâmicos oriundos do Estado da Paraíba como material de substituição parcial do cimento Portland na confecção de argamassas e concretos. Dentro do escopo deste trabalho, as seguintes conclusões puderam ser extraídas a partir dos resultados obtidos:

1. As variações observadas nos resultados de superfície específica do Resíduo Cerâmico obtidas a partir de mudanças efetuadas nos parâmetros envolvidos no processo de beneficiamento deste resíduo utilizado neste estudo são um indicativo de que o referido processo pode ser ainda otimizado com respeito a sua eficiência energética, demandando, contudo, um estudo específico para este fim.
2. O resíduo cerâmico pode representar uma alternativa mais econômica do ponto de vista energético, haja vista que, para um mesmo processo de cominuição utilizado para o seu beneficiamento, o RC atingiu maiores superfícies específicas em comparação a uma pozolana tradicionalmente utilizada pela indústria de fabricação de cimento Portland.
3. As composições química e mineralógica do RC estudado indicam que este material satisfaz as normas vigentes para pozolanas naturais de argilas calcinadas.

4. O RC estudado tem índices de atividade pozolânica satisfatórios, tanto para sistemas com cal quanto cimento, apenas para finuras superiores a  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
5. A atividade pozolânica do RC analisado aumentou com o incremento da finura tanto nos sistemas com cal quanto com cimento, porém este aumento não se deu de forma linear, indicando existir uma superfície específica ótima, considerando também o consumo energético para seu beneficiamento, em torno de  $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
6. A atividade pozolânica do RC estudado foi semelhante à da pozolana utilizada por um fabricante de cimento local, embora esta pozolana tenha apresentado maior reatividade em relação ao resíduo RC para finuras semelhantes.
7. A substituição do cimento por RC, em teores de 20% e 40%, teve pouca influência no tempo de pega de pastas de cimento Portland contendo este resíduo. No entanto, a consistência das argamassas e dos concretos avaliados tendeu a ser reduzida com aumento do teor de substituição.
8. O sistema poroso das argamassas avaliadas foi alterado com a presença do RC, de modo que os valores referentes ao índice de vazios, porosidade total e absorvidade das amostras ensaiadas foram mínimos para teores em torno de 20%.
9. Nos concretos, o aumento do teor de substituição do cimento por RC tendeu a incrementar a porosidade total e o índice de vazios, mas pouco influenciou na densidade.
10. A redução da resistência dos concretos com o aumento do teor de substituição seguiu uma distribuição que levou em consideração a atividade pozolânica deste resíduo (baseada no conceito de cimento

equivalente), evidenciando que o RC estudado atua não apenas como filler, mas também como pozolana.

11. Embora a substituição parcial do cimento por RC na confecção de concretos em teores de 20% e 40% tenha reduzido a resistência à compressão simples dos mesmos, esta redução não foi proporcional ao teor de substituição, haja vista que, para a última idade avaliada (56 dias), amostras contendo 20% e 40% de substituição retiveram 95% e 89% da resistência das amostras de controle, respectivamente.
12. De um modo geral a cura em temperatura elevada não trouxe benefícios para os concretos e argamassas testados, provavelmente por uma maior lixiviação de materiais solúveis importantes para as reações pozolânicas.
13. O resíduo cerâmico alterou a microestrutura dos concretos armados avaliados, atuando na alcalinidade de suas matrizes pela redução da quantidade de cimento, e, conseqüentemente, da quantidade de produtos solúveis como o hidróxido de cálcio (CH), como também consumindo o CH e produzindo C-S-H e outros calcio-aluminatos.
14. A reação pozolânica promovida pelo RC indica a promoção de uma melhora das propriedades das matrizes de cimento contendo estes resíduos. No entanto, a redução do pH, provocada pela diluição do cimento em decorrência de sua substituição por RC, aliada a maior redução do potencial de corrosão em ambientes salinos deve ser considerada, haja vista a maior predisposição destas matrizes a problemas de durabilidade em decorrência da corrosão de armaduras.
15. Os resultados das medidas eletroquímicas aparentam concordar com os demais ensaios efetuados em argamassas e concretos, que sugerem um teor ótimo de substituição entre 15 e 20%, uma vez que os concretos estudados contendo teores de RC iguais a 20% e 40% obtiveram

desempenhos muito próximos dos concretos de controle ao longo do tempo.

16. Embora a presente investigação sugira um potencial uso para o resíduo de cerâmica vermelha como material de substituição do cimento em concretos e argamassas, os resultados observados apontam para a necessidade da realização de avaliações mais abrangentes e em longo prazo no tocante aos parâmetros relacionados à durabilidade das matrizes contendo este resíduo, haja vista que tanto as reações pozolânicas quanto os efeitos dos possíveis agentes agressivos tornar-se-ão mais evidentes com o decorrer do tempo.

## **Sugestões para Trabalhos Futuros**

Embora a presente investigação sugira um potencial uso para o resíduo da cerâmica vermelha como material de substituição do cimento em concretos e argamassas, os resultados observados apontam para a necessidade da realização de avaliações mais abrangentes do papel do resíduo cerâmico em concretos e argamassas, no tocante a:

- Durabilidade de matrizes cimentícias contendo resíduos cerâmicos, com e sem a presença de armaduras metálicas, relativas ao seu desempenho em longo prazo, levando-se em consideração a cinética e termodinâmica dos sistemas contendo RC e agentes potencialmente agressivos ao cimento;
- Avaliação da variabilidade química e mineralógica, de resíduos cerâmicos em diferentes fontes e seus efeitos na reação pozolânica em sistemas contendo cal e cimento Portland;
- Avaliar o potencial do resíduo cerâmico frente às reações álcali-agregado;
- Acessar o efeito do agregado graúdo e de pozolanas no calor de hidratação e sua dissipação nas matrizes cimentícias;
- Quantificar a energia de cominuição do processo de beneficiamento de resíduos industriais destinados a serem utilizados como material de substituição parcial de cimentos em concretos e argamassas.

## *Referências Bibliográficas*

---

ALVES, S. M. S. **Desenvolvimento de compósitos resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica.** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 64p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214** – Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 76** – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** – Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11581** – Determinação dos tempos de pega do cimento. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223** – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone . Rio de Janeiro, 1992.

BUENFELD, N.R. NEWMAN, J.B., The development and stability of surface layers on concrete exposed to sea-water. **Cement and Concrete Research** **16**(5), 1986. p. 721-732.

Ay N.; Ünal M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research** **30**, 2000. p. 497 – 499.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFCG, 1997.

CORDEIRO, G. C. et al. **Caracterização de resíduo de tijolo cerâmico moído para uso como aditivo mineral em concretos e argamassas**. In: IBRACON – 2002, 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Belo Horizonte - Mg, 2002.

DINIZ, F. E. G. **Corrosão de materiais metálicos ferrosos empregados em dutos coletores de esgoto**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2001. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 193p.

De LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. **Modern concrete technology series, vol. 9**, E&FN SPON, London, 1999.

FARIAS FILHO, João de; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Pb. V.4 n.3 UFPB, 2000. p. 437-444.

FERREIRA, R. M.; JALALI, S. **Evaluation of tests commonly used fo measuring concrete durability**. . In: Sunstainble Construction Into the Next Millenium: Enviromentally, Friendilly and Innovative Cement Based Materials. **Anais...** João Pessoa – Pb, 2000

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-agreggate reaction, in **The alkali aggreggate reaction in concrete**. R. N. Swamy Editor. 1992, Blackie and Son Ltd: London. p. 336.

GLASSER, F. P.; KINDNESS, A.; STRONACH, S. A. Stability and solubility relationships in AFm phases: Part I. Chloride, sulfate and hydroxide. **Cement and Concrete Research** **29**(6), 1999. p. 861 – 866.



GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. Tese de Doutorado.

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

LIMA, J. B. M. **Cais pozolânicas: caracterização e desempenho mecânico**. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1993. Dissertação de Mestrado.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MIRANDA, J. M. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. GONZÁLEZ, J. A. PALOMO A. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. **Cement and Concrete Research (35)**, 2005. p. 1210 – 1217.

NASCIMENTO, W. N. et al. **Adição de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto sob o aspecto da durabilidade**. In: IBRACON –2002, 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Belo Horizonte - Mg, 2002.

OLIVEIRA, M. P. **Estudo de um caulim calcinado do estado da Paraíba como material de substituição parcial do cimento Portland**. Campina Grande: Universidade Federal de campina Grande, 2004. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. 103p.

O'FARREL, M.; WILD, S.; SABIR, B. B. Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. **Cement & Concrete Composites 23**, 2001. p. 81-91.

PEREIRA, E. F. **Caracterização e otimização do processo de moagem de matérias primas cerâmicas**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 72p.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement & Concrete Composites 23**, 2001. p. 441-454.

SABIR, B. B.; WILD, S. **Temperature effects on the strength development in concrete containing fly ash-metakaolin blended cements**. In: Sunstainble Construction Into the Next Millenium: Enviromentally, Friendilly and Innovative Cement Based Materials. **Anais...** João Pessoa – Pb, 2000.

SAKR, K. Effect of the cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques. **Cement and Concrete Research (35)**, 2005. p. 1820 – 1826.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos.** São Paulo: PCC USP, 1998. Tese de Doutorado.

SWAMY, R. N. **Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction.** In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally, Friendily and Innovative Cement Based Materials. **Anais...** João Pessoa – Pb, 2000.

TAYLOR H. F. W. **Cement chemistry.** London: Academic Press Limited, 1990.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Potential of crushed waste calcined-clay brick as a partial replacement of Portland cement. **American Concrete Institute**, 2001 - ACI SP-202, p. 147-160

TOLEDO FILHO, R. D. et al. **Desenvolvimento de concretos de baixo impacto ambiental utilizando materiais cimentícios de baixo consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>.** In: IBRACON –2002, 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Belo Horizonte - Mg, 2002.

TORRES, S. M. **The influence of chloride on the thaumasite form of sulfate attack in mortars containing calcium carbonate.** Sheffield: Faculty of Engineering. University of Sheffield, 2004. Thesis presented for the degree of doctor of philosophy. 263p.

TURANLI, L.; UZAL, B.; BEKTAS, F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. **Cement and Concrete Research** **35**, 2005. p. 1106 – 1111.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1989. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrografia. 191p.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)