# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# Microfissuração e Evolução da Hidratação de Concreto de Cimento Portland, com e sem Adição de Escória, por meio da Análise de Imagens

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

Fernando Augusto Ernlund de Freitas

Campinas 2001

CRICACE BRICES BRICES CONTRACES

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# Microfissuração e Evolução da Hidratação de Concreto de Cimento Portland, com e sem Adição de Escória, por meio da Análise de Imagens

Fernando Augusto Ernlund de Freitas

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gladis Camarini

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

|              | n second |
|--------------|---|
|              | Atesto que esta é a versão deminiva   |
|              | da dissertação/tese 24,09,01  |
| Campinas, SP | Annauttins"   |
| 2001         | Prot Dr.<br>Matrícula: Opel 30-8  |
|              |   |

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

rotha acc

### FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

| F884m | Freitas, Fernando Augusto Ernlund de.<br>Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de<br>Cimento Portland, com e sem edição de escória, por<br>meio da análise de imagens / Fernando Augusto<br>Ernlund de FreitasCampinas, SP: [s.n.], 2001.                    |
|-------|---|
|       | Orientador: Gladis Camarini.<br>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de<br>Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.   |
|       | <ol> <li>Cimento Portland. 2. Concreto – Efeito da<br/>temperatura. 3. Microestrutura. 4. Processamento de<br/>imagens auxiliado por computador. I. Camarini, Gladis.<br/>II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de<br/>Engenharia Civil. III. Título.</li> </ol> |

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

# Microfissuração e Evolução da Hidratação de Concreto de Cimento Portland, com e sem Adição de Escória, por meio da Análise de Imagens

Fernando Augusto Ernlund de Freitas

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Gladis Camarini Presidente e Orientadora / FEC UNICAMP

Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon

FEC UNICAMP

Prof. Dr. Antônio Ludovico Beraldo

FEAGRI UNICAMP

Campinas, 28 de agosto de 2001.

## UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

#### AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta caminhada de sucesso em minha vida. Sua presença me confortou e me deu força nas horas difíceis deste trabalho.

À minha namorada Melissa, pelo seu amor, carinho e compreensão nos momentos de ausência em que tive que me dedicar ao trabalho.

Aos meus pais, Renato e Lea, e minha vó Rosinha, pela força e pelo incentivo que me deram para superar todos os obstáculos e poder realizar mais esta etapa em minha vida.

À FAPESP pela concessão da bolsa de estudo a qual permitiu a boa realização deste estudo.

À Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, em especial ao Departamento de Construção Civil.

À professora Gladis Camarini, pela dedicação e paciência no acompanhamento do meu trabalho nestes últimos anos.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção e ao seu corpo de funcionários, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao Instituto de Geociências da UNICAMP, em especial ao Laboratório de Laminação de Rochas, pela preparação das seções polidas.

Ao Professor Roberto de Alencar Lotufo, da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP, pelo auxílio na análise das imagens.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (LME-LNLS), de Campinas e seu corpo técnico, pelo aprendizado da técnica de microscopia eletrônica e pela realização dos ensaios de microscopia.

À Holdercim Brasil S.A. pela doação do cimento utilizado.

À Reax pela doação do aditivo.

Aos amigos e colegas da FEC, pela amizade e companheirismo, que tornaram agradável minha estadia em Campinas. À colega Aline Rosa Martins com quem dividi parte do trabalho experimental.

Aos professores Vladimir Antonio Paulon, Vítor Antonio Ducatti, Newton de Oliveira Pinto Júnior, Mauro Augusto Demarzo, os quais muito contribuíram para minha formação.

Finalmente expresso meus sinceros agradecimentos a todos que me apoiaram durante a elaboração deste estudo.

## **UNICAMP** BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

## SUMÁRIO

## Página

| LISTA DE FIGURAS   | х    |
|--|------|
| LISTA DE TABELAS   | xvii |
| LISTA DE SÍMBOLOS  | xix  |
| RESUMO   | xxi  |
| ABSTRACT   | xxii |
| 1 INTRODUÇÃO   | 1    |
| 1.1 Objetivo   | 3    |
| 2 CIMENTO PORTLAND   | 4    |
| 2.1 Características dos principais componentes do cimento Portland | 6    |
| 2.2 Cimento Portland de alto-forno                                 | 10   |
| 2.3 Hidratação do cimento Portland                                 | 13   |
| 2.3.1 Hidratação dos aluminatos                                    | 14   |
| 2.3.2 Hidratação dos silicatos                                     | 15   |
| 2.3.3 Hidratação do cimento Portland comum                         | 17   |
| 2.3.4 Hidratação do cimento Portland de alto-forno                 | 19   |
| 3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E DESENVOLVIMENTO                 |      |
| DA MICROESTRUTURA  | 21   |
| 3.1 Métodos de observação da microestrutura                        | 21   |
| 3.2 Observação da hidratação através da microscopia                | 28   |
| 3.3 Estudos sobre o grau de hidratação                             | 31   |
| 3.4 Produtos de hidratação observados ao MEV                       | 38   |

| 3.4.1 Silicato de cálcio hidratado                          | 38  |
|---|-----|
| 3.4.2 Hidróxido de cálcio                                   | 40  |
| 3.4.3 Sulfoaluminatos de cálcio                             | 41  |
| 3.4.4 Grãos de clínquer não hidratados                      | 42  |
| 3.4.5 Vazios na pasta endurecida                            | 43  |
| 3.4.6 Água na pasta endurecida                              | 46  |
| 3.4.7 Zona de transição                                     | 47  |
| 4 CURA DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND                      | 54  |
| 4.1 Cura úmida  | 55  |
| 4.2 Cura térmica  | 58  |
| 4.3 Características dos concretos submetidos à cura térmica | 60  |
| 4.4 Microestrutura do concreto                              | 62  |
| 5 TRABALHO EXPERIMENTAL                                     | 66  |
| 5.1 Caracterização dos materiais                            | 66  |
| 5.1.1 Cimentos  | 66  |
| 5.1.2 Agregados   | 66  |
| 5.1.3 Aditivo plastificante                                 | 69  |
| 5.2 Misturas experimentais                                  | 69  |
| 5.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova                   | 69  |
| 5.2.2 Determinações físicas e mecânicas                     | 71  |
| 5.2.3 Grau de hidratação                                    | 75  |
| 5.2.4 Microfissuração                                       | 79  |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO                                    | 81  |
| 6.1 Compressão axial  | 81  |
| 6.2 Compressão diametral                                    | 85  |
| 6.3 Módulo de elasticidade                                  | 89  |
| 6.4 Absorção capilar  | 93  |
| 6.5 Permeabilidade ao ar                                    | 100 |
| 6.6 Grau de hidratação                                      | 104 |

| hidratação  |
|---|
| 6.8 Comparação dos resultados de resistência à compressão diametral e<br>grau de hidratação |
| grau de hidratação 112<br>6.9 Comparação dos resultados de módulo e grau de hidratação 114  |
| 6.9 Comparação dos resultados de módulo e grau de hidratação 114                            |
|   |
| 6.10 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e grau de                            |
| <b>hidratação</b>   |
| 6.11 Comparação dos resultados de absorção capilar (k) e grau de hidratação 117             |
| 6.12 Comparação dos resultados de ascensão capilar (s) e grau de                            |
| <i>hidratação</i>   |
| 6.13 Comparação dos resultados de grau de hidratação do centro e da                         |
| <b>superfície</b> 121   |
| 6.14 Comparação dos resultados de resistência à compressão axial e módulo                   |
| de elasticidade   |
| 6.15 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e ascensão capilar. 125              |
| 6.16 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e absorção capilar. 126              |
| 6.17 Imagens da microfissuração 127   |
| 6.18 Relação entre as imagens da microfissuração e o grau de hidratação 135                 |
| 7 CONCLUSÕES  |
| 8 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA 138   |
| 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS  |
| <b>ANEXOS</b>   |
| Anexo A - Preparação das amostras para análise ao MEV                                       |
| Anexo B - Resultados dos ensaios  |
| Anexo C - Gráficos de absorção capilar160   |
| Anexo D - Imagens analisadas 165  |
| <b>APÊNDICE</b>   |
| Apêndice A - Algoritmo utilizado  |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   | Pa  | ágina |
|-------------|---|---|-------|
| Figura 2.1  |   | Grão anidro e camada de C-S-H numa imagem obtida por elétrons retroespalhados               | 13    |
| Figura 2.2  | - | Curva da hidratação do C <sub>3</sub> A na presença de sulfato de cálcio                    | 15    |
| Figura 2.3  | - | Curva calorimétrica representativa da hidratação do C <sub>3</sub> S ao longo do tempo      | 16    |
| Figura 2.4  | - | Curva de calor de hidratação X tempo de hidratação do cimento Portland                      | 18    |
| Figura 2.5  |   | Curva de tempo X calor total  | 20    |
| Figura 3.1  | - | Diagrama de difração de raios-X de uma amostra de clínquer                                  | 22    |
| Figura 3.2  | * | Micrografia da seção polida de uma amostra de clínquer obtida por microscopia de luz        |       |
|             |   | refletida, sendo os grãos mais claros de $C_3S$ , os mais escuros de $C_2S$ e a fase        |       |
|             |   | intersticial de C <sub>3</sub> A e C <sub>4</sub> AF  | 23    |
| Figura 3.3  |   | Esquema de funcionamento do MEV   | 25    |
| Figura 3.4  | - | Partes integrantes do Microscópio Eletrônico de Varredura                                   | 25    |
| Figura 3.5  | - | Interação feixe-amostra e tipos de sinais do microscópio eletrônico de varredura            | 26    |
| Figura 3.6  | - | Esquema da metalização de amostra   | 27    |
| Figura 3.7  | - | Imagens de grãos de cimento anidro obtidas ao MEV. (a) Por elétrons secundários. (b)        |       |
|             |   | Por elétrons retroespalhados  | 27    |
| Figura 3.8  | - | Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento          |       |
|             |   | Portland  | 30    |
| Figura 3.9  | - | Evolução da hidratação em pasta com relação água/cimento de 0,5                             | 32    |
| Figura 3.10 | - | Aumento da relação água/cimento para uma hidratação completa ( $\alpha$ =1)                 | 33    |
| Figura 3.11 | - | Microestrutura da pasta de cimento. (a) pasta fresca, (b) 7 dias, (c) 28 dias, (d) 90 dias. | 34    |
| Figura 3.12 | - | Caracterização da fase anidra - Contorno na fase mais escura                                | 37    |
| Figura 3.13 | + | Caracterização da fase dos agregados - Contorno na fase mais clara                          | 37    |
| Figura 3.14 | * | Imagem obtidas ao MEV do CSH tipo I, II e III   | 39    |
| Figura 3.15 | - | Imagens obtidas no MEV - Ca(OH) <sub>2</sub>  | 41    |
| Figura 3.16 |   | Imagem da Etringita e do Monossulfato hidratado   | 42    |
| Figura 3.17 | ~ | Imagens de grão de cimento anidro obtidas ao MEV. (a) Por elétrons secundários. (b)         |       |
|             |   | Por elétrons retroespalhados  | 43    |

| Figura 3.18 | - | Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida                      | 45 |
|-------------|---|---|----|
| Figura 3.19 | + | Água na pasta endurecida e estruturas de C-S-H  | 47 |
| Figura 3.20 | - | Estrutura da zona de transição - Modelo de Barnes de 1980                             | 49 |
| Figura 3.21 | - | Estrutura da zona de transição - Modelo de Ollivier e Grandet de 1982                 | 49 |
| Figura 3.22 | - | Estrutura da zona de transição - Modelo de Zimbelman de 1985                          | 50 |
| Figura 3.23 | - | Estrutura da zona de transição - Modelo de Monteiro de 1986                           | 50 |
| Figura 3.24 | - | Estrutura da zona de transição - Modelo de Mehta e Monteiro, 1994                     | 51 |
| Figura 3.28 | - | Ruptura do concreto na Interface matriz - agregado                                    | 52 |
| Figura 3.29 | - | Amostra da zona de transição de concretos com e sem adições                           | 53 |
| Figura 4.1  | - | Ciclo de cura térmica   | 59 |
| Figura 4.2  | - | Curvas de tempo X taxa de liberação de calor  | 62 |
| Figura 4.3  | - | Imagens retroespalhadas de pasta de cimento com a/c de 0,55                           | 63 |
| Figura 4.4  | - | Cura em água a 20 ºC por 27 dias  | 64 |
| Figura 4.5  | - | Cura térmica à 65 °C seguida de 27 días ao ar   | 64 |
| Figura 4.6  | - | Pastas de cimento com 70% de hidratação curadas a 23 °C e 70 °C                       | 65 |
| Figura 5.1  | - | Curva granulométrica da areia   | 68 |
| Figura 5.2  | - | Curva granulométrica da brita   | 68 |
| Figura 5.3  | - | Ciclo de cura térmica   | 70 |
| Figura 5.4  | - | Câmara de cura térmica  | 71 |
| Figura 5.5  | - | Esquema do ensaio de absorção capilar   | 72 |
| Figura 5.6  | - | Aparelho de permeabilidade ao ar  | 75 |
| Figura 5.7  | - | Esquema das amostras de microscopia   | 76 |
| Figura 5.8  | - | Seleção da fase agregado (vermelho) e da fase grão anidro (verde). Exemplo de uma     |    |
|             |   | amostra de CP III submetida à cura úmida por 7 dias na idade de 180 dias              | 78 |
| Figura 5.9  | - | Seleção da fase fissuras e vazios (preto). Exemplo de uma amostra do centro de CP III |    |
|             |   | submetida à cura úmida por 7 dias na idade de 180 dias. Área de vazios = 1%           | 80 |
| Figura 5.10 | - | Imagem original da Figura 5.9 Exemplo de uma amostra do centro de CP III submetida    |    |
|             |   | à cura úmida por 7 dias na idade de 180 dias  | 80 |
| Figura 6.1  | - | Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP III                  | 82 |
| Figura 6.2  | ÷ | Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP V ARI - RS           | 82 |
| Figura 6.3  | - | Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP V ARI - PLUS         | 83 |
| Figura 6.4  | - | Resistência à compressão axial dos concretos submetido à cura úmida por 7 dias        | 84 |
| Figura 6.5  | - | Resistência à compressão axial dos concretos submetido à cura térmica                 | 85 |
| Figura 6.6  | - | Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP III.  | 86 |
| Figura 6.7  | - | Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP V $$  |    |
|             |   | ARI - RS  | 86 |

| Figura 6.8  | - | Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP V<br>ARI - PLUS | 87  |
|-------------|---|---|-----|
| Figura 6.9  | - | Resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos à cura úmida             | 88  |
| Figura 6.10 |   | Resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos à cura térmica           | 89  |
| Figura 6.11 |   | Módulo de elasticidade do CP III  | 90  |
| Figura 6.12 | - | Módulo de elasticidade do CP V ARI - RS   | 90  |
| Figura 6.13 | - | Módulo de elasticidade do CP V ARI - PLUS   | 91  |
| Figura 6.14 | - | Módulo de elasticidade dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias                         | 92  |
| Figura 6.15 | - | Módulo de elasticidade dos concretos submetidos à cura térmica                                  | 92  |
| Figura 6.16 | - | Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP III   | 93  |
| Figura 6.17 | - | Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP III   | 94  |
| Figura 6.18 | - | Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP III  | 94  |
| Figura 6.19 | - | Ascensão capilar (s) do concreto com CP IIII  | 95  |
| Figura 6.20 | - | Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP V ARI - RS                                      | 95  |
| Figura 6.21 |   | Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP V ARI - RS                                      | 96  |
| Figura 6.22 | - | Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP V ARI - RS                                     | 96  |
| Figura 6.23 | - | Ascensão capilar (s) do concreto com CP V ARI - RS  | 97  |
| Figura 6.24 | - | Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP V ARI - PLUS                                    | 97  |
| Figura 6.25 | - | Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP V ARI - PLUS                                    | 98  |
| Figura 6.26 | - | Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP V ARI - PLUS                                   | 98  |
| Figura 6.27 | - | Ascensão capilar (s) do concreto com CP V ARI - PLUS  | 99  |
| Figura 6.28 | - | Permeabilidade ao ar do concreto com CP III   | 100 |
| Figura 6.29 | - | Permeabilidade ao ar do concreto com CP V ARI - RS  | 101 |
| Figura 6.30 | - | Permeabilidade ao ar do concreto com CP V ARI - PLUS  | 101 |
| Figura 6.31 | - | Permeabilidade ao ar do concreto submetido à cura úmida por 7 dias                              | 103 |
| Figura 6.32 | - | Permeabilidade ao ar do concreto submetido à cura térmica                                       | 103 |
| Figura 6.33 | - | Grau de hidratação do centro do concreto com CP III   | 104 |
| Figura 6.34 |   | · Grau de hidratação do centro do concreto com CP V ARI - RS                                    | 105 |
| Figura 6.35 | - | Grau de hidratação do centro do concreto com CP V ARI - PLUS                                    | 105 |
| Figura 6.36 | - | Grau de hidratação do centro do concreto submetido à cura úmida por 7 dias                      | 106 |
| Figura 6.37 | - | Grau de hidratação do centro do concreto submetido à cura térmica                               | 107 |
| Figura 6.38 | - | · Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o           |     |
|             |   | concreto produzido com CP III   | 107 |
| Figura 6.39 | - | · Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o           |     |
|             |   | concreto produzido com CP V ARI - RS  | 108 |

| Figura 6.40 | - Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o |     |
|-------------|---|-----|
|             | concreto produzido com CP V ARI - PLUS  | 108 |
| Figura 6.41 | - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos           |     |
|             | concretos produzidos com o cimento Portland de alto-forno                             | 110 |
| Figura 6.42 | - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos           |     |
|             | concretos produzidos com o cimento Portland ARI - RS                                  | 110 |
| Figura 6.43 | - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos           |     |
|             | concretos produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS                                | 111 |
| Figura 6.44 | - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de           |     |
|             | hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland de alto forno              | 113 |
| Figura 6.45 | - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de           |     |
|             | hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - RS                   | 113 |
| Figura 6.46 | - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de           |     |
|             | hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS                 | 114 |
| Figura 6.47 | - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos         |     |
|             | produzidos com o cimento Portland de alto-forno                                       | 115 |
| Figura 6.48 | - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos         |     |
|             | produzidos com o cimento Portland ARI - RS  | 115 |
| Figura 6.49 | - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos         |     |
|             | produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS  | 116 |
| Figura 6.50 | - Comparação da permeabilidade ao ar com o grau de hidratação dos concretos           |     |
|             | submetidos à cura úmida por 7 dias  | 117 |
| Figura 6.51 | - Comparação da absorção capilar (k) com o grau de hidratação dos concretos           |     |
|             | submetidos à cura úmida por 7 dias  | 118 |
| Figura 6.52 | - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP III   | 119 |
| Figura 6.53 | - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP V ARI - RS  | 120 |
| Figura 6.54 | - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP V ARI - PLUS  | 120 |
| Figura 6.55 | - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP III   | 121 |
| Figura 6.56 | - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP V ARI - RS  | 122 |
| Figura 6.57 | - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos           |     |
|             | produzidos com CP V ARI - PLUS  | 122 |

| Figura 6.58 | - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos           |     |
|-------------|---|-----|
|             | concretos produzidos com CP III   | 123 |
| Figura 6.59 | - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos           |     |
|             | concretos produzidos com CP V ARI - RS  | 124 |
| Figura 6.60 | - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos           |     |
|             | concretos produzidos com CP V ARI - PLUS  | 124 |
| Figura 6.61 | - Comparação da permeabilidade ao ar e ascensão capilar (s) dos concretos produzidos  |     |
|             | com CP V ARI - PLUS   | 125 |
| Figura 6.62 | - Comparação da permeabilidade ao ar e absorção capilar (k) dos concretos produzidos  |     |
|             | com CP V ARI - PLUS   | 126 |
| Figura 6.63 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP III submetido à cura |     |
|             | úmida por 7 días. Area de vazios desta imagem igual a 1%                              | 128 |
| Figura 6.64 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP III submetido à cura |     |
|             | térmica. Área de vazios desta imagem igual a 2%                                       | 128 |
| Figura 6.65 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - RS           |     |
|             | submetido à cura úmida por 7 dias. Area de vazios desta imagem igual a 1,2%           | 129 |
| Figura 6.66 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - RS           |     |
|             | submetido à cura térmica. Area de vazios desta imagem igual a 1,8%                    | 129 |
| Figura 6.67 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - PLUS         |     |
|             | submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,5%           | 130 |
| Figura 6.68 | - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - PLUS         |     |
|             | submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 1,6%                    | 130 |
| Figura 6.69 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP III submetido à |     |
|             | cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,5%                       | 132 |
| Figura 6.70 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP III submetido à |     |
|             | cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 2,8%                                | 132 |
| Figura 6.71 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - RS      |     |
|             | submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,6%           | 133 |
| Figura 6.72 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - RS      |     |
|             | submetido à cura térmica. Àrea de vazios desta imagem igual a 2,2%                    | 133 |
| Figura 6.73 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - PLUS    |     |
|             | submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,3%           | 134 |
| Figura 6.74 | - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - PLUS    |     |
|             | submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 1,9%                    | 134 |
| Figura 1    | - Detalhe do corpo-de-prova posicionado para o corte inicial                          | 146 |
| Figura 2    | <ul> <li>Corpo-de-prova cortado e marcação do próximo corte</li> </ul>                | 146 |
| Figura 3    | - Polimento durante 5 minutos com carbeto de silício nº. 320                          | 147 |

| Figura 4  | - | Polimento durante 5 minutos com carbeto de silício nº. 600                        | 147 |
|-----------|---|---|-----|
| Figura 5  | - | Detalhe das amostras ainda sem resina, pastas diamantadas e do lubrificante       | 148 |
| Figura 6  |   | Aplicação da pasta diamantada de 7 μm   | 149 |
| Figura 7  | - | Aplicação do lubrificante sobre a pasta diamantada de 7 $\mu m$                   | 149 |
| Figura 8  | - | Polimento da amostra com a pasta diamantada de 7 $\mu$ m durante 30 minutos       | 150 |
| Figura 9  | - | Polimento da amostra com a pasta diamantada de 3 µm durante 30 minutos            | 150 |
| Figura 10 | - | Polimento da amostra com a pasta diamantada de 1 $\mu$ m durante 30 minutos       | 151 |
| Figura 11 | - | Aparelho para a metalização da amostra  | 152 |
| Figura 12 | - | Amostra de concreto metalizada, pronta para ir ao MEV                             | 152 |
| Figura 13 | ~ | Observação da amostra metalizada no MEV   | 152 |
| Figura 14 | - | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias aos 28 dias     | 160 |
| Figura 15 | - | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias aos 90 dias     | 161 |
| Figura 16 | - | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias aos 180 dias    | 161 |
| Figura 17 | ~ | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 28 dias              | 162 |
| Figura 18 | - | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 90 dias              | 162 |
| Figura 19 | - | Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 180 dias             | 163 |
| Figura 20 | - | Absorção capilar (s) dos concretos submetidos à cura úmida                        | 163 |
| Figura 21 | - | Absorção capilar (s) dos concretos submetidos à cura térmica                      | 164 |
| Figura 22 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 28 dias   | 166 |
| Figura 23 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 90 dias   | 167 |
| Figura 24 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 180 dias  | 168 |
| Figura 25 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | térmica, na idade de 28 dias  | 169 |
| Figura 26 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | térmica, na idade de 90 dias  | 170 |
| Figura 27 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura |     |
|           |   | térmica, na idade de 180 días   | 171 |
| Figura 28 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura      |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 28 dias   | 172 |
| Figura 29 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura      |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 90 dias   | 173 |
| Figura 30 | - | Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura      |     |
|           |   | úmida por 7 dias, na idade de 180 dias  | 174 |

| Figura 31 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura   |     |
|-----------|--|-----|
|           | térmica, na idade de 28 dias   | 175 |
| Figura 32 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura   |     |
|           | térmica, na idade de 90 dias   | 176 |
| Figura 33 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS submetido à cura   |     |
|           | térmica, na idade de 180 dias  | 177 |
| Figura 34 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | úmida por 7 dias, na idade de 28 dias  | 178 |
| Figura 35 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | úmida por 7 dias, na idade de 90 dias  | 179 |
| Figura 36 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | úmida por 7 dias, na idade de 180 dias   | 180 |
| Figura 37 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | térmica, na idade de 28 dias   | 181 |
| Figura 38 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | térmica, na idade de 90 dias   | 182 |
| Figura 39 | - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS submetido à cura |     |
|           | térmica, na idade de 180 dias  | 183 |

## LISTA DE TABELAS

| Página |
|--------|
|--------|

| Tabela 2.1 | - Compostos potenciais do cimento Portland   | 7   |
|------------|--|-----|
| Tabela 2.2 | - Características dos principais componentes do cimento Portland                   | 8   |
| Tabela 2.3 | - Teores de escória no cimento Portland de acordo com a ABNT                       | 12  |
| Tabela 2.4 | - Seqüência da hidratação do C₃S   | 17  |
| Tabela 2.5 | - Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland                            | 19  |
| Tabela 3.1 | - Relação entre dimensão das partículas de cimento Portland e tempo de hidratação, |     |
|            | sob condições normais de cura  | 29  |
| Tabela 3.2 | - Classificação dos tamanhos de poros na pasta de cimento endurecida               | 45  |
| Tabela 4.1 | - Tempo mínimo de cura, em dias, em função do tipo de cimento e da relação água /  |     |
|            | cimento  | 57  |
| Tabela 4.2 | - Recomendação japonesa do período de cura dos cimentos com adição de escória      | 57  |
| Tabela 5.1 | - Características, composição química e potencial dos cimentos                     | 67  |
| Tabela 5.2 | - Caracterização dos agregados   | 68  |
| Tabela 5.3 | - Dosagem empregada nesta pesquisa   | 69  |
| Tabela 5.4 | - Séries de concreto a serem ensaiadas   | 71  |
| Tabela 1   | - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento       |     |
|            | Portland de alto-forno   | 153 |
| Tabela 2   | - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento ARI - |     |
|            | RS   | 153 |
| Tabela 3   | - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento ARI - |     |
|            | PLUS   | 154 |
| Tabela 4   | - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o     |     |
|            | cimento Portland de alto-forno   | 154 |
| Tabela 5   | - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o     |     |
|            | cimento ARI - RS   | 154 |

| Tabela 6  | - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o   |     |
|-----------|--|-----|
|           | cimento ARI - PLUS   | 155 |
| Tabela 7  | - Valores do módulo de elasticidade do cimento Portland de alto-forno            | 155 |
| Tabela 8  | - Valores do módulo de elasticidade do cimento ARI - RS                          | 155 |
| Tabela 9  | - Valores do módulo de elasticidade do cimento ARI - PLUS                        | 156 |
| Tabela 10 | - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland de alto-forno | 156 |
| Tabela 11 | - Valores da absorção capilar (s) do concreto com cimento Portland de alto-forno | 156 |
| Tabela 12 | - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland ARI - RS      | 157 |
| Tabela 13 | - Valores da absorção capilar (s) do concreto com cimento Portland ARI - RS      | 157 |
| Tabela 14 | - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland ARI - PLUS    | 157 |
| Tabela 15 | - Valores da absorção capilar (s) do concreto com cimento Portland ARI - PLUS    | 157 |
| Tabela 16 | - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento Portland de alto-forno | 158 |
| Tabela 17 | - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento ARI - RS               | 158 |
| Tabela 18 | - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento ARI - PLUS             | 158 |
| Tabela 19 | - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento Portland de alto-forno   | 159 |
| Tabela 20 | - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento ARI - RS                 | 159 |
| Tabela 21 | - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento ARI - PLUS               | 159 |
| Tabela 22 | - Grau de hidratação dos concretos obtidos de seções polidas do centro e da      |     |
|           | extremidade  | 159 |

# LISTA DE SÍMBOLOS

| C <sub>3</sub> S              | Silicato tricálcico  |
|-------------------------------|--|
| C <sub>2</sub> S              | Silicato dicálcico   |
| C <sub>3</sub> A              | Aluminato tricálcico   |
| C₄AF                          | Ferroaluminato tetracálcico  |
| Å                             | Angstrom (10 <sup>-10</sup> m)   |
| MEV                           | Microscopia Eletrônica de Varredura  |
| SE                            | elétrons secundários   |
| BSE                           | elétrons retroespalhados   |
| C-S-H                         | Silicato de cálcio hidratado   |
| $C_6AS_3H_{32}$               | etringita  |
| СН                            | Ca(OH) <sub>2</sub>  |
| 3C₄A <u>S</u> H <sub>18</sub> | Monossulfoaluminato de cálcio  |
| Н                             | H <sub>2</sub> O   |
| С                             | CaO  |
| S                             | SiO <sub>2</sub>   |
| AFt                           | Fase impura da etringita   |
| AFm                           | Fase impura do monossulfato  |
| α <sub>ΙΑ</sub>               | Grau de hidratação através da análise de imagens                                   |
| A <sub>28</sub>               | Fração da área de grãos anidros presentes na pasta do concreto na idade de 28 dias |
| $\Gamma_0$                    | Fração inicial de grãos anidros presentes na pasta do concreto                     |
| ρ <sub>c</sub>                | Massa específica real do cimento (kg/cm <sup>3</sup> )                             |
| S                             | ascensão capilar (m.s <sup>-1/2</sup> )  |
| t                             | tempo (s)  |
| Z                             | altura de penetração da água (m)   |

| k <sub>abs</sub> | coeficiente de absorção capilar (kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ) |
|------------------|--|
| Wo               | massa inicial do corpo-de-prova (kg)                                   |
| W <sub>t</sub>   | massa do corpo-de-prova no tempo de ensaio (kg)                        |
| Am               | área da seção transversal do corpo-de-prova (m <sup>2</sup> )          |
| K <sub>per</sub> | permeabilidade ao ar (m <sup>2</sup> )                                 |
| h <sub>o</sub>   | altura inicial do nível da água (m)                                    |
| ht               | altura final da água, no tempo t (m)                                   |
| μ                | viscosidade do ar (Pa.s)   |
| S                | seção do tubo capilar (mm²)  |
| А                | Área da seção do corpo-de-prova (mm²)                                  |
| γ                | massa específica da água (kg/m³)                                       |
| g                | gravidade (m/s²)   |
| 1                | altura do corpo-de-prova (m)   |
| Сх               | Coeficiente de variação máximo   |
| Dp               | Desvio padrão máximo   |
| IC               | Intervalo de confiança   |

#### RESUMO

FREITAS, Fernando Augusto Ernlund de. Microfissuração e Evolução da Hidratação de Concreto de Cimento Portland, com e sem Adição de Escória, por meio da Análise de Imagens. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 185p. Dissertação (Mestrado). - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2001.

As condições de temperatura e umidade durante o período de cura, têm grande influência no desenvolvimento da microestrutura, durabilidade e outras propriedades do concreto. A microscopia eletrônica tem sido usada para analisar as diferenças na microestrutura e no grau de hidratação de amostras submetidas a diferentes tipos de cura. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar as características mecânicas, absorção capilar, permeabilidade ao ar, além da evolução da hidratação por meio da análise de imagens de concretos, submetidos a dois tipos de cura: cura térmica à 60 °C e cura úmida por sete dias. Nesta pesquisa foram utilizados o cimento Portland de alto-forno (53% de escória), o cimento de alta resistência inicial sem adições (sem adição de escória) e o cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (27% de escória).

**Palavras Chave:** Cimento Portland de Alto-Forno; Concreto; Cura; Microestrutura, Análise de Imagens.

#### ABSTRACT

FREITAS, Fernando Augusto Ernlund de. Microfissuração e Evolução da Hidratação de Concreto de Cimento Portland, com e sem Adição de Escória, por meio da Análise de Imagens Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 185p. Dissertação (Mestrado). - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2001.

Temperature and moist conditions during the curing period have great influence in the development in microstructure, durability and other properties of concrete. Electronic microscopy has been used to analyze the differences in microstructure, degree of hydration and microcracks, on samples submitted to different types of curing. The objective in this research is evaluate the mechanical properties, water absorption, air permeability and the evolution of hydration by image analysis of polished sections of concrete, submitted to two types of curing, steam thermal curing (60 °C) and another one, with moist curing during seven days. In this research the blast furnace slag cement was used (53% of slag), the cement with high initial strength without additions (without slag) and the cement with high initial strength with additions (27% of slag). The increase of curing temperature is an activator of slag, present in blast furnace slag cement, than, this research intends to verify the influence of slag addition in the concrete properties.

**Keywords:** Blast Furnace Slag Cement; Concrete; Curing; Microstructure, Image Analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento é um material essencial na construção civil e, além de sua importância econômica e social, tem contribuído para a solução de vários problemas ambientais, mediante o aproveitamento, em seu processo de produção de inúmeros resíduos poluidores como matéria-prima, combustível ou adições.

A utilização de rejeitos industriais na fabricação do cimento proporciona um inestimável ganho ecológico e econômico. Ao se utilizar esses materiais busca-se também resolver o problema da sua remoção e prevenindo a poluição.

Os concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno podem ser indicados para obras com grandes volumes, como barragens e grandes blocos, caso apresentem baixo calor de hidratação, esses concretos apresentam bom desempenho quando expostos a ambientes agressivos, como água do mar e esgotos, além de ter bons resultados em concretos de alta resistência.

Diversos estudos técnicos vêm sendo realizados para conhecer o comportamento do cimento Portland de alto-forno quando submetido a diferentes condições de cura. Esse material apresenta excelentes propriedades tanto na resistência como na durabilidade dos concretos.

As características microscópicas do concreto são alvo de vários estudos principalmente com o avanço da microscopia e sua utilização no estudo dos materiais de construção.

1

A microestrutura do concreto de cimento Portland de alto-forno apresenta mais microporos, que não são interconectados, além de distribuir melhor os esforços atuantes e dificultando a entrada de agentes agressivos no concreto. Essas características ocorrem devido às reações de hidratação lentas, as quais permitem uma melhor distribuição e precipitação dos produtos de hidratação.

O presente trabalho visa observar o grau de hidratação e microfissuração do concreto por meio da análise de imagens empregando cimentos com adição de escória submetidos a diferentes tipos de cura. Para isso, dividiu-se o trabalho em sete partes.

Na parte dois, o cimento Portland é observado sob o ponto de vista tradicional. São apresentados, na sequência, um breve histórico, o processo de fabricação, os compostos potenciais e suas características, e a hidratação das fases que compõem o cimento.

Na parte três, há uma breve referência sobre os métodos de análise da microestrutura, onde é abordada a hidratação do cimento Portland por meio da observação de sua microestrutura.

A parte quatro apresenta o processo de cura do cimento, abordando tanto a cura convencional como a cura térmica, objetos de estudo neste trabalho experimental. Apresenta também as características e diferenças dos concretos submetidos a diferentes condições de cura, com as modificações causadas em suas microestruturas.

A parte cinco detalha o programa experimental adotado: avaliou-se as características físicas, propriedades mecânicas, absorção capilar, permeabilidade ao ar e microscopia.

Na parte seis são apresentados os resultados obtidos bem como a sua análise.

Na parte sete encontram-se as conclusões extraídas deste trabalho.

2

### 1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral estimar o grau de hidratação e observar microfissuração de concretos por meio da análise de imagens, além de avaliar as características mecânicas, absorção capilar e permeabilidade ao ar quando submetidos a dois ciclos de cura. O primeiro ciclo foi o de cura térmica a 60 °C e o outro de cura úmida por 7 dias. Para isso foram produzidos concretos utilizando três tipos de cimento: o cimento Portland de alto-forno (53% de escória), o cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (27% de escória) e o cimento Portland de alta resistência inicial sem adições.

Para atingir o objetivo foi preciso:

- Investigar em base macroscópica concretos com diferentes teores de escória de alto-forno comparando-os entre si, observando a influência das condições de cura nesses concretos.
- Observar a evolução do grau de hidratação e o seu relacionamento com outras características do concreto.
- Por meio da análise de imagens, observar as diferenças entre as amostras do centro e da extremidade dos corpos-de-prova.

#### **2 CIMENTO PORTLAND**

Cimento pode ser considerado como sendo todo e qualquer material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. O termo "cimento" é proveniente do latim "Caecmentun".

A utilização de cimentos é muito antiga. Os romanos já usavam uma mistura de cal, cinza obtida na cidade de Pozzuoli, ou telhas de argila queimadas e finamente moídas, obtendo um aglomerante que endurecia sob a ação da água. Por volta de 1756, o engenheiro John Smeaton procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Eddystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções, valorizando a função da argila na mistura, até então considerada indesejável. Coube, entretanto, ao construtor Joseph Aspdin, em 1824, patentear a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência a Portlandstone, devido à semelhança de cor e qualidade com um calcário muito usado na região de Portland, na Inglaterra (Klemm, 1989).

O cimento Portland é constituído de uma mistura de materiais calcários e argilosos. O processo de fabricação pode ser por via úmida ou seca. Através de dosagens controladas e pré-estabelecidas, os materiais são conduzidos a um moinho de bolas, sendo reduzido a um material bem fino, chamado de farinha, que é

armazenada em grandes silos verticais. Com um processo térmico adequado e devidamente controlado, em um forno rotativo a uma temperatura de 1450 °C, a farinha é transformada no principal componente, o clínquer. Esse processo térmico desenvolve-se em três etapas:

- 1. Pré-aquecimento de 850 °C a 950 °C, descarbonatação no pré-aquecedor;
- 2. Clinquerização no forno à temperatura de 1450 °C a 1500 °C;
- Resfriamento brusco do clínquer, através da injeção de grandes volumes de ar à temperatura ambiente.

As reações que ocorrem no forno podem ser classificadas simplificadamente da seguinte maneira (Lea, 1970):

- 1. Evaporação da água livre, 20 °C a 100 °C Moagem da farinha;
- 2. Liberação da água combinada na argila, 100 °C a 300 °C Pré-aquecedor;
- 3. Dissociação do carbonato de magnésio, 600 °C a 900 °C Pré-aquecedor;
- 4. Dissociação do carbonato de cálcio, 600 °C a 900 °C Pré-aquecedor;
- 5. Combinação da cal e da argila, Forno Zona de calcinação.

Os principais componentes do cimento Portland são formados no forno e aparecem na seguinte seqüência (Lea, 1970):

- 1. 800 °C: Início da formação do C<sub>2</sub>S;
- 2. 900 °C 1100 °C: Início da formação do C<sub>3</sub>A e C₄AF. Todo CaCO<sub>3</sub> foi decomposto em CO<sub>2</sub>, que se dissipa, e em CaO;
- 3. 1100 °C 1200 °C: Formação da maior parte do C<sub>3</sub>A e C₄AF. Nessa temperatura há formação de C₂S;

4. 1200 °C – 1450 °C: Formação do C<sub>3</sub>S, consumindo CaO.

Na produção do cimento Portland, além do clínquer, são utilizadas adições de sulfato de cálcio, *filler* calcário, escórias de alto-forno e pozolanas. Esses materiais são

moídos em um moinho de bolas ou barras, juntamente com o clínquer, e são armazenados nos silos de estocagem até a expedição em sacos ou a granel.

Em 1887, o químico francês Henri Le Chatelier publicou sua tese sobre a química do cimento Portland. Ele estabelecia as proporções em óxidos dos materiais para produzir o cimento Portland. Atualmente, a composição típica do clínquer apresenta, em valores aproximados, 67% de CaO (óxido de cálcio), 22% de SiO<sub>2</sub> (sílica), 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de ferro) e 3% de outros componentes. Esses componentes são MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sulfatos e outros materiais em menor quantidade (Taylor, 1992).

#### 2.1 Características dos principais componentes do cimento Portland

Para o estudo da química do cimento é usual empregar uma nomenclatura e abreviações particulares. Por exemplo, o silicato tricálcico, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, é escrito 3CaO.SiO<sub>2</sub>, não implicando em separação dos constituintes ou variação da sua estrutura. É usual ainda abreviar os óxidos por letras, sendo C para o CaO e S para o SiO<sub>2</sub>, sendo o Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> chamado de C<sub>3</sub>S.

As abreviações mais usadas são as seguintes:

| C = CaO              | $S = SiO_2$          | $A = AI_2O_3$         | $F = Fe_2O_3$         |
|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| M = MgO              | K = K <sub>2</sub> O | $\overline{S} = SO_3$ | N = Na <sub>2</sub> O |
| T = TiO <sub>2</sub> | $P = P_2O_5$         | $H = H_2O$            | $\overline{C} = CO_2$ |

Com o conhecimento dessas abreviações e dos principais compostos presentes no cimento, facilita-se o estudo da química do cimento Portland.

Na análise química do clínquer, obtem-se seus componentes em óxidos, e utilizando uma estimativa proposta por R. H. Bogue, é possível encontrar os valores em termos percentuais dos compostos potenciais do clínquer; mas, para isso, algumas simplificações devem ser feitas. Assume-se que os quatro componentes principais são o C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e o C<sub>4</sub>AF, que todo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente ocorre no C<sub>4</sub>AF, e que o restante do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ocorre no C<sub>3</sub>A (Taylor, 1992). Além disso, assume-se que todos os materiais formados são cristais. Com essas simplificações, as equações propostas por R. H. Bogue podem ser escritas por:

 $C_2S = 2,8675.SiO_2 - 0,7544.C3S$ 

 $C_3A = 2,6504.Al_2O_3 - 1,6920.Fe_2O_3$ 

 $C_4AF = 3,0432.Fe_2O_3$ 

Na Tabela 2.1 são mostrados os compostos potenciais do cimento Portland, sua composição, abreviação e porcentagem na sua composição. A Tabela 2.2 apresenta algumas características dos seus principais componentes.

Tabela 2.1 - Compostos potenciais do cimento Portland (Lea, 1970; Taylor, 1992).

| Nome do composto            | Composição em óxidos                | Abreviação       | (%)   |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|-------|
| Silicato tricálcico         | 3CaO.SiO <sub>2</sub>               | C <sub>3</sub> S | 50-70 |
| Silicato dicálcico          | 2CaO.SiO <sub>2</sub>               | $C_2S$           | 15-30 |
| Aluminato tricálcico        | 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>3</sub> A | 5-10  |
| Ferroaluminato tetracálcico | $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$              | C₄AF             | 5-15  |

| Componente       | Resistência  | Calor de   | Velocidade de | Sistema     | Resistência à |
|------------------|--------------|------------|---------------|-------------|---------------|
|                  | mecânica     | hidratação | hidratação    | cristalino  | agressividade |
| C <sub>3</sub> S | Alta inicial | Médio      | Média         | Monoclínico | Média         |
| $C_2S$           | Alta final   | Baixo      | Lenta         | Monoclínico | Grande        |
| C <sub>3</sub> A | Nenhuma      | Elevado    | Rápida        | Cúbico      | Pequena       |
| C₄AF             | Nenhuma      | Médio      | Média         | Monoclínico | Indiferente   |

Tabela 2.2 - Características dos principais componentes do cimento Portland (Taylor, 1992; Mehta, 1994).

A seguir, são apresentadas as características de cada composto potencial.

#### a) C<sub>3</sub>S

O silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), também chamado de Alita, é o principal constituinte do clínquer e constitui cerca de 50-70% de sua massa. Sua fórmula pura é Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, mas sua composição e estrutura podem mudar um pouco na presença de íons Mg<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup> e Fe<sup>+3</sup>. No forno, quando a temperatura é maior que 1450 °C, os cristais são menores e mais íons são incorporados à sua estrutura. Quando as temperaturas são menores, os cristais são maiores e menos íons são incorporados. Pode se apresentar em três tipos de estruturas: monoclínica, triclínica e romboédrica. Ele reage relativamente rápido com a água, e é o principal componente para o desenvolvimento de resistência aos 28 dias (Taylor, 1992).

#### b) $C_2S$

O silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), também chamado de Belita, constitui de 15-30% do clínquer. Sua fórmula é Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, e pura contém 34,9% de SiO<sub>2</sub> e 65,1% de CaO, mas sua composição e estrutura também podem mudar um pouco na presença de alguns íons; no clínquer apresenta-se na forma  $\beta$ . Dependendo das condições de temperatura no interior do forno e da quantidade de impurezas presentes, cinco tipos de C<sub>2</sub>S podem ser formados,  $\alpha$ ,  $\alpha'_{H}$ ,  $\alpha'_{L}$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , diferenciados pelos íons incorporados nas suas estruturas. Pode se apresentar na forma monoclínica e romboédrica. Reage lentamente

com a água porque tem uma estrutura mais regular, ou seja, mais estável que o C<sub>3</sub>S. Contribui para a resistência nas idades avançadas (Taylor, 1992).

c) C<sub>3</sub>A

O aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) constitui cerca de 5-10% do clínquer do cimento Portland. Sua formula é Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, mas sua composição e estrutura podem mudar um pouco na presença de íons Si<sup>+4</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Fe<sup>+3</sup>. Na sua forma pura contém 62,3% de CaO e 37,7% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Geralmente é encontrado na forma cúbica ou ortorrômbica. A forma monoclínica também pode ser encontrada, mas não no clínquer do cimento Portland. Ele reage rapidamente com a água e libera uma grande quantidade de calor (Taylor, 1992).

#### d) C<sub>4</sub>AF

O ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) constitui de 5-15% do clínquer do cimento Portland. Na sua forma pura contém 46,1% de CaO, 21,0% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 32,9% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sua fórmula é Ca<sub>2</sub>AlFeO<sub>5</sub>, mas pode mudar por causa da variação da relação Al/Fe e pela incorporação de alguns íons. É encontrado na forma monoclínica, tetraédrica ou octaédrica (Taylor, 1992).

#### e) Compostos Alcalinos e Sulfatos

Os compostos alcalinos Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O se encontram em abundância na natureza misturados nas matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland, principalmente na argila. A quantidade total de álcalis no cimento em geral não ultrapassa 1,5%. Os sulfatos podem ser provenientes das argilas e dos calcários, e do combustível do forno de cimento. No cimento Portland comum, a gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) ou sulfato de cálcio anidro (CaSO<sub>4</sub>) é adicionado ao clínquer retardando sua pega instantânea (Taylor, 1992).

#### f) Outros Compostos

O TiO<sub>2</sub> pode ser originário da argila, e substitui a sílica no cimento formando  $3CaO.TiO_2$  e  $2CaO.TiO_2$ , com estruturas análogas ao  $C_3S$  e  $C_2S$ , que aumentam a

resistência nas primeiras idades. A presença de  $Mn_2O_3$  no cimento forma o  $4CaO.Al_2O_3.Mn_2O_3$ , análogo ao  $C_4AF$ , podendo trazer um sensível ganho de resistência. A presença de  $CaF_2$  altera a formação e o endurecimento do  $C_3S$  e do  $C_2S$ . O  $P_2O_5$  provoca a decomposição do  $C_3S$  para  $C_2S$  e reage com a cal liberada. Além desses compostos, existem outros óxidos adicionais provenientes da matéria-prima, e eles influem na temperatura de fusão da mistura, ou seja, na fase de clinquerização, diminuindo essa temperatura (Lea, 1970).

#### 2.2 Cimento Portland de alto-forno

A indústria brasileira de cimento tornou-se, a partir de 1952, uma tradicional usuária de escória de alto-forno. A utilização desse subproduto visa incrementar a durabilidade do concreto e racionalizar o consumo de cimento. O emprego de subprodutos traz vantagens adicionais, pois, além da sua eliminação, reduz-se o consumo de energia e diminui-se a emissão de gases típicos da indústria de cimento. Com isso, a escória tornou-se um material nobre para uso em cimento e concreto e seu consumo deve crescer ainda mais. A produção do primeiro tipo de cimento com escória, moída junto com o clínquer ocorreu na Alemanha em 1892 (Lea, 1970).

A escória é obtida em uma das primeiras etapas da produção do aço. Faz-se a fusão da matéria-prima em elevadas temperaturas (1550 °C), e com a combinação do minério de ferro, da cinza do coque, do calcário e dolomito, empregados como fundentes, resultam na escória que, menos densa que o ferro, permanece na superfície do sistema. Dessa maneira, as duas fases são facilmente separadas e o ferro fundido pode seguir no processo até ser transformado em aço. A escória líquida é resfriada bruscamente, transformando-se na escória granulada de alto-forno, que é um material vítreo com propriedades hidráulicas latentes (Neville, 1982; Bauer, 1987; Camarini, 1995).

10

Os componentes da escória são os mesmos óxidos presentes no cimento Portland, mas em proporções diferentes e o principal composto reativo é o  $Ca_2SiO_4$ . Os óxidos encontrados são o CaO (30% - 50%), MgO (0% - 21%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5% - 33%), SiO<sub>2</sub>(27% - 42%), além de outros produtos em menor quantidade, como o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o MnO (Lea, 1970, Taylor, 1992). Além disso, a composição dos minérios, fundentes e impurezas presentes no alto-forno deve ser adequada, para que seja compatível e possa ser utilizada com o cimento Portland.

Como é resfriada bruscamente assim que sai do alto-forno, a escória se solidifica num estado vítreo, com estrutura desordenada, e grande potencial reativo. Se as partículas granuladas ou pelotizadas resultantes forem finamente moídas, o material desenvolverá propriedades cimentantes. Ainda assim, a hidratação será lenta, sendo necessário que outra substância ativadora seja adicionada. O clínquer é um ativador da escória, pois apresenta em sua composição compostos ativadores. A presença de CaO, álcalis, sulfato de cálcio, produção de Ca(OH)<sub>2</sub> quando em contato com a água, e a liberação de calor devido à reação de hidratação são os principais ativadores. No caso de ser resfriada lentamente, a escória adquire uma estrutura cristalina, perdendo o potencial reativo, mas pode ser usada como agregado para concreto (Lea, 1970; Taylor, 1992; Camarini, 1995; Silva, 1998).

No Brasil, é comum adicionar escória ao cimento em diferentes teores. Geralmente, ela é moída junto com o clínquer a uma finura equivalente à do cimento. A ABNT regulamenta os teores de escória presentes no cimento Portland, podendo tais valores serem observados na Tabela 2.3.

A escória tem atraído a atenção dos pesquisadores nas últimas décadas, não só pelos benefícios gerados na resistência mecânica e durabilidade de cimentos, mas também pelo mecanismo de hidratação. A importância técnica da escória de alto-forno no cimento tem quatro aspectos principais: primeiro, a microestrutura da pasta de cimento de alto-forno é muito similar às pastas de cimento Portland puro, com exceção da baixa quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub>; segundo, a reação é lenta, resultando em baixa

11

liberação de calor e desenvolvimento lento de resistência; terceiro, a reação produz menos Ca(OH)<sub>2</sub>, contribuindo para as características de durabilidade; quarto, os produtos resultantes se mostram bastante eficientes no preenchimento dos poros capilares, melhorando a impermeabilidade do sistema (Camarini, 1995; Silva, 1998).

| <u> </u>                         | Cimento Portland | Cimento Portland | Cimento Portland |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                  | comum            | composto         | de alto-forno    |
| Sigla                            | CP I-S           | CP II - E        | CP III           |
| Classes de resistência           | 25, 32 e 40      | 25, 32 e 40      | 25, 32 e 40      |
| Clínquer + CaSO <sub>4</sub> (%) | 99 – 95          | 94 – 56          | 65 – 25          |
| Escória granulada (%)            | 1 – 5 *          | 6 – 34           | 35 – 70          |
| Material pozolânico (%)          | 1 – 5 *          | -                | -                |
| Material carbonático (%)         | 1 – 5 *          | 0 – 10           | 0 – 5            |
| Norma regulamentadora            | NBR 5732/91      | NBR 11578/91     | NBR 5735/91      |

Tabela 2.3 - Teores de escória no cimento Portland de acordo com a ABNT.

\* Apenas um tipo de adição no mesmo cimento.

A temperatura de cura aumenta a velocidade de hidratação da escória, resultado da maior solubilidade da escória e da aceleração da precipitação de compostos hidratados (Camarini, 1995; Silva, 1998). Observa-se, ainda, que a elevação da temperatura de cura é mais eficiente para altos teores de escória (50% a 70%) (Camarini, 1995). Além disso, concretos com pouca adição de escória (30%) praticamente não têm um ganho significativo de resistência. O teor ideal para se obter a maior resistência mecânica é de 50% (Camarini, 1995; Jain e Pal, 1998).

#### 2.3 Hidratação do cimento Portland

O termo hidratação refere-se às reações do cimento com a água que ocorrem com o transcorrer do tempo, dando origem a uma matriz firme e resistente (Mehta e Monteiro, 1994).

O mecanismo de hidratação inicialmente envolve processos de dissolução e precipitação. Primeiro, a dissolução dos compostos anidros em componentes iônicos, e a precipitação dos hidratos devido à sua baixa solubilidade. Esse processo é dominante nos estágios iniciais, devido à disponibilidade de espaço na pasta. Num estágio seguinte, tem-se o processo topoquímico ou hidratação no estado sólido, em que a hidratação ocorre na superfície do grão anidro, ocorrendo uma redução progressiva do tamanho do grão (Mehta e Monteiro, 1994). Na Figura 2.1 é mostrado o estágio topoquímico. Pode-se observar que a região mais clara da figura é o grão anidro e, ao redor, a camada de C-S-H. O estudo da hidratação do cimento Portland se faz observando o comportamento de cada composto potencial isoladamente quando em contato com a água.



Figura 2.1 - Grão anidro e camada de C-S-H numa imagem obtida por elétrons retroespalhados (Scrivener, 1989).

#### 2.3.1 Hidratação dos aluminatos

A hidratação dos aluminatos é imediata, mas no cimento Portland, devido à presença da gipsita, esta reação é mais lenta. Os produtos de hidratação formados pelo C<sub>3</sub>A e o C<sub>4</sub>AF são semelhantes.

O C<sub>3</sub>A apresenta uma grande solubilidade, mas na presença dos sulfatos essa solubilidade é diminuída, tendo como o produto dessa hidratação a etringita  $(C_6A \ \overline{S}_3H_{32})$ . A reação de formação da etringita é (Jawed *et al.*, 1983; Taylor, 1992):

 $C_3A + 3C \ \overline{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A \ \overline{S}_3H_{32} + CALOR$ 

A etringita é o primeiro hidrato a se cristalizar devido à elevada relação sulfato/aluminato no início da hidratação. A formação da etringita contribui para a perda de consistência e para o início da solidificação da pasta, com a formação de um pico de calor. Mais tarde, de 30 a 40 horas decorrentes do contato do cimento com a água, depois do sulfato (gipsita) ter sido consumido, e se ainda houver C<sub>3</sub>A presente, a concentração de aluminatos se eleva e a etringita torna-se instável sendo convertida em monossulfato, com a formação de um segundo pico de calor. Quando a concentração dos aluminatos diminui, a etringita torna-se estável (Figura 2.2). A reação da etringita com o aluminato é a seguinte (Jawed *et al.*, 1983; Taylor, 1992):

 $C_{6}A \overline{S}_{3}H_{32} + 2C_{3}A + 4H \rightarrow 3C_{4}A \overline{S}H_{12} + CALOR$ 

A hidratação do ferroaluminato tetracálcico também é influenciada pela presença da gipsita, embora não seja tão rápida quanto a do C<sub>3</sub>A. No entanto, a reação do C<sub>4</sub>AF com o sulfato e com a água gera um produto similar à etringita (Mehta e Monteiro, 1994).


Figura 2.2 - Curva da hidratação do C<sub>3</sub>A na presença de sulfato de cálcio (Jawed et al., 1983)

## 2.3.2 Hidratação dos silicatos

O C<sub>3</sub>S e o C<sub>2</sub>S constituem quase 90% do cimento Portland. A hidratação do C<sub>3</sub>S e do C<sub>2</sub>S produz o principal produto de hidratação: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse produto de hidratação é responsável pelas características mecânicas e pela durabilidade do concreto. Os íons sulfato, que entram em solução pela dissolução da gipsita, têm um efeito retardador nos aluminatos e acelerador nos silicatos.

As reações de hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$ , são as seguintes (Jawed *et alli*, 1983):

 $2C_3S + 7H \rightarrow C_3S_2H_4 + 3CH + CALOR$  ( $\Delta H= -1114 \text{ kJ/mol}$ )  $2C_2S + 5H \rightarrow C_3S_2H_4 + 1CH + CALOR$  ( $\Delta H= -43 \text{ kJ/mol}$ )

A hidratação do C<sub>3</sub>S é dividida em 5 estágios (Figura 2.3).



**Figura 2.3** - Curva calorimétrica representativa da hidratação do C<sub>3</sub>S ao longo do tempo (Jawed *et al.*, 1983).

No primeiro estágio, denominado de período inicial, o C<sub>3</sub>S reage rapidamente com grande liberação de calor, e ao redor do grão de C<sub>3</sub>S forma-se uma camada de produto hidratado diminuindo a velocidade da reação. No segundo estágio, a velocidade da reação diminui, conseqüentemente, a liberação de calor também. Nesse período, denominado período de indução, forma-se uma camada de produto de hidratação ao redor dos grãos, o que impede a continuidade das reações; com o passar do tempo essa camada vai ficando mais permeável e vai se desfazendo. Aliado a esse fenômeno, tem-se o crescimento do C-S-H que também contribui para o final desse período. O terceiro estágio, conhecido como período de aceleração, é caracterizado pela rápida formação de hidróxido de cálcio e de C-S-H, diminuindo a concentração dos íons Ca<sup>+2</sup> na mistura; dá-se início a um novo pico de calor. O guarto estágio, período de desaceleração da velocidade da reação, torna mais difícil a reação pelo mecanismo dissolução-precipitação. No quinto estágio, período de difusão iônica, a reação prossegue lentamente com pouco desenvolvimento de calor, e a microestrutura vai tornando-se mais densa. Na Tabela 2.4 estão resumidas as reações de hidratação do  $C_3S$ .

A reação do  $C_2S$  é muito mais lenta do que a do  $C_3S$ . Apesar de serem formados pelos mesmos elementos, o  $C_3S$  é muito mais reativo, pois os íons oxigênio se concentram num lado de cada íon cálcio, deixando vazios estruturais responsáveis pela alta energia e reatividade da estrutura. No  $C_2S$ , esses vazios são menores e a

estrutura é mais regular, tornando esse composto menos reativo (Metha e Monteiro, 1994).

| Período       | Estágio da Reação | Processos Químicos   | Comportamento Cinético<br>Total                                    |
|---------------|-------------------|--|--|
| Inicial       | I. Pré-hidratação | Hidrólise inicial; liberação<br>de íons  | Reações muito rápidas e<br>quimicamente<br>controladas             |
|               | II. Indução       | Dissolução continuada,<br>formação inicial de C-S-H                                      | Nucleação lenta  |
|               | III. Aceleração   | Crescimento inicial dos<br>compostos hidratados  | Reações rápidas e<br>quimicamente<br>controladas                   |
| Intermediário | IV. Desaceleração | Crescimento contínuo de<br>compostos hidratados;<br>desenvolvimento da<br>microestrutura | Reações moderadas,<br>controladas<br>quimicamente e por<br>difusão |
| Final         | V. Difusão        | Densificação gradual da<br>microestrutura  | Reações muito lentas e<br>controladas por difusão                  |

Tabela 2.4 - Seqüência da hidratação do C<sub>3</sub>S. (Jawed et al., 1983).

## 2.3.3 Hidratação do cimento Portland comum

Na Figura 2.4 apresenta-se a curva de hidratação do cimento Portland, mostrando a evolução da taxa de liberação de calor a o longo do pelo tempo de hidratação. Fica caracterizado que inicialmente ocorre um pico de calor decorrente da dissolução dos compostos anidros e formação da etringita; depois, o período de indução, em que há pouco calor liberado. Em seguida, inicia-se um novo pico, devido à rápida formação de C-S-H e CH marcando o início da pega. Após algumas horas,

ocorre o final da pega. A taxa de liberação de calor continua aumentando até o processo topoquímico se tornar mais significativo onde, então, há uma diminuição da taxa de calor, aproximadamente 30 ou 40 horas depois do início da reação de hidratação. Nessa fase há formação do monosulfoaluminato, apresentando um pequeno pico de desenvolvimento de calor. Essa reação ocorre somente se houver aluminato disponível na mistura para reagir com a etringita. Por fim, a taxa de calor diminui, sendo o processo topoquímico o mais importante para a densificação da microestrutura. Observa-se que a taxa de liberação de calor ao longo do tempo é semelhante à dos silicatos.



Figura 2.4 - Curva de calor de hidratação X tempo de hidratação do cimento Portland (Jawed et al., 1983).

A Tabela 2.5 apresenta valores do calor de hidratação dos compostos do cimento Portland. (Valores em cal/g) (Mehta e Monteiro, 1994).

| Composto         | 3 dias | 90 dias | 13 anos |
|------------------|--------|---------|---------|
| C <sub>3</sub> S | 58     | 104     | 122     |
| $C_2S$           | 12     | 42      | 59      |
| C <sub>3</sub> A | 212    | 311     | 324     |
| C₄AF             | 69     | 98      | 102     |

Tabela 2.5 - Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland (Mehta e Monteiro, 1994).

#### 2.3.4 Hidratação do cimento Portland de alto-forno

A hidratação inicial do cimento Portland de alto-forno é mais lenta que a do cimento Portland comum, em função da baixa solubilidade da escória em água. As reações de hidratação dos cimentos com escória têm sua velocidade controlada principalmente pela reatividade da escória, tipo e concentração do ativador e temperatura.

Ao misturar-se o cimento de alto-forno à água, os grãos de escória iniciam sua dissolução, liberando íons de Ca<sup>+2</sup>. Logo, os grãos de escória são envolvidos por uma membrana rica em sílica e alumina, apresentando baixa permeabilidade, o que cria uma barreira para o prosseguimento da hidratação. Somente quando os componentes do cimento Portland começam a hidratar-se é que o conseqüente aumento do pH da solução dissolve a membrana, e permite o prosseguimento da reação do grão com a água e com hidratos do cimento. Por essa razão, a confecção de cimentos de escória necessita do emprego de ativadores, compostos químicos que elevam o pH. Assim, a aceleração da reação é muito dependente do pH da solução, e o aumento do pH reduz o período de indução. Os produtos de hidratação do cimento de escória são os mesmos obtidos com o cimento Portland. A principal reação é com o hidróxido de cálcio,

resultando em C-S-H, porém outras fases, como AFm e Aft, também são encontradas (Neville, 1982; Silva, 1998).

Como citado anteriormente, há somente um pico de calor para o cimento Portland comum; porém, para o cimento com adição de escória existem dois picos. O primeiro pico refere-se à hidratação dos compostos do cimento, correspondente ao período de aceleração. O segundo pico é o correspondente à hidratação dos compostos da escória e, para uma mesma temperatura, o tempo necessário para o seu aparecimento é o mesmo, não importando o teor de adição (Camarini, 1995).

A Figura 2.5 apresenta a diferença de calor total liberado adicionando-se escória granulada de alto-forno ao cimento Portland comum, comprovando que a adição de escória granulada de alto-forno reduz esse "pico" de liberação de calor, devido às reações de hidratação mais lenta, minimizando a diferença de temperatura entre a mistura de cimento e o ambiente.



Figura 2.5 - Curva de tempo X calor total (Camarini e Cincotto, 1996).

# 3. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E DESENVOLVIMENTO DA MICROESTRUTURA

#### 3.1 Métodos de observação da microestrutura

Existem diferentes técnicas de análise da microestrutura do concreto que podem fornecer informações quantitativas ou qualitativas dos seus componentes. Essas técnicas podem ser divididas em duas principais categorias: indiretas, que fornecem dados sobre as características gerais da microestrutura, e diretas, que informam sobre a maneira como as fases componentes estão arranjadas (Scrivener, 1989). As técnicas diretas, particularmente a microscopia óptica, a microscopia eletrônica por elétrons secundários e por elétrons retroespalhados serão citadas neste trabalho.

Técnicas indiretas, em geral mais quantitativas, permitem uma análise comparativa mais objetiva. Entre as indiretas tem-se a porosimetria por intrusão de mercúrio, a termogravimetria e a difração de raios-X. A porosimetria por intrusão em mercúrio, é uma das técnicas mais utilizadas para a caracterização física de materiais porosos (cerâmica, concretos), fornecendo boas informações sobre a distribuição volumétrica de poros com dimensão entre 150 μm e 0,003 μm (Silva, 2000).

Na análise termogravimétrica isotérmica, a amostra é mantida em temperatura constante, enquanto vai-se registrando a variação de massa ao longo do tempo. Já no

caso da termogravimetria dinâmica, a temperatura é elevada gradualmente a uma velocidade controlada, enquanto a variação de massa é analisada. Em ambos os casos, os resultados são melhor avaliados quando já se tem uma idéia prévia dos constituintes esperados na amostra, sabendo-se a que temperatura eles devem ser dissociados ou eliminados (Silva, 2000).

A difratometria de raios-X acontece de forma semelhante ao que ocorre nos fenômenos de difração de luz visível: quando uma estrutura cristalina é exposta a um feixe de raios-X é produzido um efeito de difração destes raios, emitindo sua radiação em todas as direções. O material é exposto aos raios-X, com determinados comprimentos de onda, e as camadas dos átomos difratam os raios produzindo picos característicos. O aparelho de raios-X é conectado a um medidor automático dos ângulos de refração ( $\theta$ ) e suas correspondentes intensidades. Usando-se raios-X de comprimento de onda ( $\lambda$ ) conhecido e medindo-se  $\theta$ , pode-se perfeitamente calcular o espaço interplanar *d* (Lei de Bragg) (Mehta e Monteiro, 1994). Como as distâncias interplanares de um cristal são suas características, consegue-se identificá-lo e quantificá-lo quando se comparam os valores com registros pré-obtidos de substâncias conhecidas (Figura 3.1).





As imagens obtidas pelas técnicas diretas permitem caracterizar a microestrutura, porém, são mais subjetivas e dependem da experiência e interpretação do observador. Nessa categoria encaixam-se as microscopias óptica e eletrônica.

A microscopia óptica tem sido amplamente usada no estudo de cimento e concreto, indicando a presença de adições minerais, grau de hidratação, qualidade da compactação e a presença de reações álcali-sílica (Scrivener, 1989). Apresenta baixo custo, além da facilidade de aquisição e operação do equipamento. Essa microscopia é feita por transparência ou reflexão. A partir de uma amostra bastante fina e, muitas vezes, com o auxílio de resinas contrastantes, pode-se indicar o tipo de cimento e agregado, a presença de adições minerais e a qualidade de compactação. Pode-se também analisar quantitativamente as fases cristalinas por contagem planimétrica (Scrivener, 1989). O poder de aumento pode chegar a 1500 vezes e as imagens obtidas são semelhantes à da Figura 3.2.



Figura 3.2 - Micrografia da seção polida de uma amostra de clínquer obtida por microscopia de luz refletida, sendo os grãos mais claros de C<sub>3</sub>S, os mais escuros de C<sub>2</sub>S e a fase intersticial de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF (Mehta e Monteiro, 1994).

A maioria dos cristais presentes no cimento são demasiadamente pequenos para serem observados pelo microscópio óptico. A microscopia eletrônica resolve esse

problema, com aumentos que variam de 100 a 100 mil vezes e poder de resolução estimado em 30 Å (Scrivener, 1989).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem sido muito utilizada na análise da microestrutura de inúmeros materiais, como metais, polímeros, cerâmicas, incluindo concreto, argamassa e pasta de cimento, materiais biológicos, entre outros.

É um equipamento que permite a observação e a análise da superfície de amostras por meio de imagens tridimensionais. A razão principal de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, da ordem de 30 Å, cerca de 300 vezes maior que o microscópio óptico (Andrade e Veiga, 1998).

Basicamente, no microscópio eletrônico de varredura, o feixe de elétrons produzido por um filamento de tungstênio aquecido é acelerado por um cátodo e, posteriormente, atravessa lentes eletromagnéticas que o focalizam sobre a superfície do espécime em observação. As lentes tornam o feixe muito estreito da ordem de 0,01 µm. O feixe de elétrons "varre a superfície da amostra" segundo uma linha; após atingir a extremidade oposta da superfície, o feixe de elétrons varre uma nova linha (Figura 3.3). Na Figura 3.4 são apresentadas as partes integrantes do microscópio eletrônico de varredura.



Figura 3.3 - Esquema de funcionamento do MEV (Iowa State University).



Figura 3.4 - Partes integrantes do microscópio eletrônico de varredura (Iowa State University).

Quando um feixe de elétrons incide sobre a superfície de um material, originamse diferentes sinais que podem ser detectados independentemente. Os efeitos são os de reflexão e absorção de elétrons, emissão de elétrons secundários (SEI), emissões de elétrons retroespalhados (BSE), raios-X, catodoluminescência e geração de calor (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Interação feixe-amostra e tipos de sinais do microscópio eletrônico de varredura (Andrade e Veiga, 1998).

A intensidade dos elétrons secundários detectados durante a varredura é determinada por três fatores: topografia da superfície, variação de voltagem e composição da amostra. As imagens são obtidas por um detector secundário e fornece informações tridimensionais da amostra, que refletem a topografia da amostra. Os elétrons secundários são os mais importantes na formação da imagem no MEV. No entanto, exige que a amostra esteja seca e exposta ao vácuo do microscópio, o que pode causar alterações na morfologia dos cristais.

As imagens por elétrons retroespalhados são obtidas por um detector retroespalhado (BSE) utilizando amostras espessas, com superfícies polidas e permite a observação em duas dimensões. O efeito de elétrons retroespalhados é mais forte nos elementos com alta massa atômica maior. Esta ferramenta ajuda a distinguir as diferentes fases de um mineral.

As amostras a serem analisadas ao MEV necessitam de preparação prévia. No caso de amostras não condutoras de elétrons, como polímeros, cerâmicas, amostras

biológicas e concretos, o procedimento requer que as superfícies sejam recobertas por uma camada de um material condutor de elétrons (metais ou ligas metálicas), cujo processo é denominado "Metalização de Amostras". Sendo o concreto um material de alta resistividade elétrica, antes de ser submetido à microscopia eletrônica ele deve passar por esse processo. A amostra é recoberta por uma camada de metal condutor de elétrons (Figura 3.6) permitindo, assím, a obtenção de imagens de grande resolução (Figura 3.7).



Figura 3.6 - Esquema da metalização de amostra (Andrade e Veiga, 1998).



Figura 3.7 - Imagens de grãos de cimento anidro obtidas ao MEV (Scrivener, 1989). (a) Elétrons secundários. (b) Elétrons retroespalhados.

#### 3.2 Observação da hidratação através da microscopia

O processo de hidratação observado através da microscopia apresenta três estágios, onde as reações que ocorrem e suas velocidades variam bastante. As divisões desse processo ocorrem, aproximadamente, entre 3 e 24 horas (Scrivener, 1989).

O primeiro é o estágio inicial da hidratação. Nos primeiros minutos após a mistura do cimento com a água, nota-se o aparecimento de uma camada gelatinosa na superfície do grão anidro de cimento. Essa fase é difícil de ser observada microscopicamente porque a maioria da água de amassamento ainda está livre. Inicia-se a rápida dissolução dos sulfatos e aluminatos, produzindo pico de liberação calor de hidratação.

Nas horas seguintes, a concentração de silicatos diminui enquanto aumenta a de íons cálcio; então, inicia-se a formação de CH e C-S-H. A taxa de calor liberado na hidratação diminui e a viscosidade aumenta. A duração desse período é de cerca de 3 horas.

O segundo é o estágio intermediário da hidratação. Esta fase começa após 3 horas e termina em 24 horas, aproximadamente. Os grãos reagem formando C-S-H e CH a partir do C<sub>3</sub>S. As camadas superficiais de C-S-H, que iniciaram a cristalização, desprendem-se do grão, permitindo que a água o atinja e que novas camadas de C-S-H sejam formadas. Inicia-se um novo pico de calor de hidratação e o entrelaçamento dos cristais de diferentes grãos estabelece o fim de pega e início do ganho de resistência, com a diminuição da porosidade. O C-S-H tipo I e o C-S-H tipo II predominam. Após 24 horas, aproximadamente, cerca de 30% da hidratação já ocorreu, e os grãos menores que 5  $\mu$ m estão completamente hidratados, enquanto que os grãos entre 5  $\mu$ m e 15  $\mu$ m reagem até 7 dias, porém esses valores variam com o teor e reatividade do cimento, visto

que existe uma relação entre dimensão da partícula e tempo de hidratação (grau de hidratação), conforme pode ser observado na Tabela 3.1. Da mesma forma, o tamanho dos cristais hexagonais de Ca(OH)<sub>2</sub> será controlado pelo espaço disponível para seu desenvolvimento. É neste estágio que começa a aderência partícula-partícula e pasta-agregado.

| <br>Dimensão da partícula (µm) | Tempo de hidratação (dias)            |  |  |  |
|--------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| <br>0,43 a 0,47                | 1                                     |  |  |  |
| 1,7 a 2,6                      | 7                                     |  |  |  |
| 3,5 a 5,4                      | 28                                    |  |  |  |
| 6,1 a 8,9                      | 150                                   |  |  |  |
| >45                            | Muito difícil de ocorrer a hidratação |  |  |  |
| >75                            | Nunca se hidratam                     |  |  |  |
|                                |                                       |  |  |  |

**Tabela 3.1** - Relação entre dimensão das particulas de cimento Portland e tempo de hidratação sob condições normais de cura (Taylor, 1992).

O terceiro é o estágio final da hidratação. Á medida que a hidratação continua, a camada de C-S-H torna-se mais densa e a taxa de emissão de calor diminui significativamente. Acredita-se que a desaceleração da hidratação se deve à dificuldade da água atingir o núcleo anidro, ou seja, a permeabilidade diminui bastante dificultando que a água alcance o grão anidro. Com isso, o processo topoquímico torna-se muito significativo.

O ganho de resistência continua, mas seu crescimento desacelera com o tempo. Após os 28 dias, esse ganho é controlado pela hidratação do C<sub>2</sub>S, numa taxa muito pequena.

Na Figura 3.8 é mostrado um diagrama esquemático do desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland.



a) Grão anidro, b) 10 minutos, c) 10 horas, d) 18 horas, e) 1 a 3 dias, f) 14 dias.
Figura 3.8 - Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland (Scrivener, 1989).

Na sequência será apresentada a descrição da evolução da hidratação apresentada na Figura 3.8.

a) Seção de um grão anidro de cimento Portland em contato com a água,

- b) O grão começa a reagir e a concentração de íons na solução aumenta. Nesse início da hidratação formam-se lâminas de C-S-H na superfície do C<sub>3</sub>S e um gel amorfo rico em aluminato na superfície do C<sub>3</sub>A, onde aparece a nucleação de pequenas agulhas de Aft (fase de formação da etringita). Após uma hora de hidratação formam-se pequenos bastões de etringita;
- c) Período de aceleração, quando ocorre um rápido crescimento do C-S-H e CH. É a reação do C<sub>3</sub>S para produzir C-S-H externo sobre a malha de Aft, deixando 1 μm entre a superfície do grão e a "carapaça" ou "casca" hidratada. A morfologia do C-S-H é laminar e o CH precipita-se nos poros saturados como placas hexagonais;

- d) Crescimento secundário da Aft. Nesse estágio, como conseqüência da continuidade da hidratação do C<sub>3</sub>S, o C-S-H começa a se formar no interior da carapaça hidratada;
- e) Formação de discos hexagonais de Afm (fase de formação do monossulfato) decorrente da hidratação do C<sub>3</sub>A com o Aft. A contínua formação de produtos internos reduz a separação entre os grãos anidros e a concha hidratada;
- f) Forma-se C-S-H interno suficiente para preencher o espaço entre o grão e a carapaça. As estruturas observadas em "e" e "f" indicam a evolução da hidratação nas idades mais avançadas, quando os poros estão significativamente reduzidos (Scrivener, 1989).

## 3.3 Estudos sobre o grau de hidratação

A estimativa do grau de hidratação em concretos de cimento Portland é muito difícil devido à heterogeneidade do concreto, e esta variação ocorre até dentro do mesmo corpo-de-prova. A exsudação, grumos de cimento e vazios são alguns fatores que influenciam o grau de hidratação.

A água é colocada junto com o cimento formando a pasta. Em geral, uma pequena parte dela acaba evaporando, devido ao calor liberado da reação. A parte necessária para a hidratação completa dos compostos anidros é em torno de 23 g de água para cada 100g de cimento (Neville, 1982; Taylor, 1992), ou seja, para uma relação água/cimento de 0,23. A água restante é a água de amassamento necessária para obter a trabalhabilidade desejada.

Mesmo usando relações água/cimento acima de 0,23 sempre existe a presença de grãos anidros na pasta, pois é muito difícil ocorrer uma hidratação completa devido

ao tamanho dos grãos. Os grãos menores hidratam-se mais rápido. Os grãos maiores não se hidratam completamente porque no estágio topoquímico da hidratação a camada de C-S-H vai ficando mais densa ao redor do grão, dificultando o contato da água com a sua parte anidra (Taylor, 1992).

Na Figura 3.9 é mostrada a evolução da hidratação para uma pasta com relação água/cimento de 0,5. Percebe-se que a água reage com o cimento formando os produtos de hidratação, que vão aumentando com o tempo. Os poros capilares vão diminuindo, mas ainda há água presente nestes poros.

A Figura 3.10 apresenta a hidratação completa de uma pasta de cimento para diferentes relações água/cimento. Mesmo para uma relação água/cimento igual a 0,4 sempre há cimento anidro. Para relações água/cimento maiores, existe uma grande quantidade de água nos capilares. O volume dos poros do gel é sempre o mesmo, independentemente da relação água/cimento.



Figura 3.9 - Evolução da hidratação em pasta com relação água/cimento de 0,5 (Mindess e Young, 1981).



Figura 3.10 - Aumento da relação água/cimento para uma hidratação completa (α=1) (Mindess e Young, 1981).

O grau de hidratação, de maneira geral, não pode ser relacionado com a resistência à compressão por vários motivos: as adições no cimento, condições de cura, homogeneização e adensamento da mistura, entre outros fatores. Então, realmente é muito difícil avaliar o grau de hidratação, pois em qualquer método de análise esses fatores estão presentes. Existem vários métodos para esse tipo de estudo, e a difração de raios-X, a análise termogravimétrica e a microscopia vêm sendo aprimoradas constantemente.

A análise quantitativa por difração de raios-X é uma ferramenta usada para o estudo da hidratação do cimento. Há algumas dificuldades no emprego deste tipo de análise, pois os silicatos de cálcio hidratado não produzem picos; o hidróxido de cálcio exibe uma orientação preferencial e carbonata na exposição ao ar. O uso de elementos padrão apropriados para a avaliação quantitativa é um fator importante para esse tipo de análise experimental (Ash e Mellas, 1993). Além disso, essa análise não é possível para argamassas e concretos, porque boa parte do volume da amostra é constituída por agregado, e os picos de sílica são muito intensos e mascaram os picos de outros componentes (Ash e Mellas, 1993).

Ao observar a microestrutura de uma pasta de cimento ao longo do tempo (Figura 3.11), percebe-se que os grãos anidros vão diminuindo de tamanho, devido à reação com a água O volume inicialmente ocupado pela água vai sendo ocupado pelos produtos de hidratação (Mindess e Young, 1981).





Uma outra técnica para estimar o grau de hidratação é a microscopia. Ash *et al.* (1993) desenvolveram uma técnica para analisar o grau de hidratação de um concreto. Os concretos são moldados e curados normalmente até a idade escolhida para análise do grau de hidratação. As amostras são cortadas perpendicularmente ao eixo longitudinal com uma serra diamantada para produzir fatias de 3 milímetros. A seguir, são imersas em metanol para interromper o processo de hidratação, removendo-se a

água e, posteriormente, as amostras são secas sobre gel de silicone. Após a colocação da amostra no microscópio eletrônico, a imagem formada por elétrons retroespalhados é visualizada em um monitor. As imagens obtidas não são coloridas mas apresentam uma variação de 256 níveis de brilho, representados em tons de cinza. Essas imagens são analisadas em um software de computador que calcula as áreas em uma escala escolhida, que vai de escura a brilhante. Escolhendo-se um determinado brilho, os pontos que contêm aquele nível de brilho são vistos na tela com um contraste de cor apropriado, sendo mostrada a porcentagem daquele nível de brilho na imagem. O nível mais baixo "0" é o ponto o mais escuro na tela, e o nível "255" é o mais brilhante.

A pasta endurecida do cimento Portland é considerada como constituída essencialmente por produtos de hidratação, grãos anidros de cimento e poros. Para o estudo da pasta de cimento, esses três níveis são ajustados, onde os poros apresentam os níveis de brilho mais baixos e os grãos anidros os mais altos. Os grãos finos de areia são identificados facilmente na imagem e esta fase é removida da imagem pelo computador. As três áreas são selecionadas e calculadas como uma porcentagem da área total da imagem. Os cálculos são médias de dez imagens separadas feitas de maneira aleatória sob a ampliação de 450 vezes.

Ash e Mellas (1993), usando essa técnica, identificaram diferenças entre amostras originárias do centro e da superfície dos corpos-de-prova, principalmente para as amostras curadas ao ar; mas para as amostras curadas na água essa diferença foi muito pequena. Concluíram que as variações na cura proporcionam concretos de diferentes estruturas, que podem ser analisadas empregando o MEV.

Mais recentemente essa técnica foi novamente empregada para estimar o grau de hidratação, porém com ampliação de 100 vezes (Mouret, 1997).

Assumindo uma homogeneidade na distribuição dos grãos de cimento na pasta do concreto, o grau de hidratação baseado na análise de imagens foi calculado por (Mouret, 1997):

$$\alpha_{281A} = 1 - (A_{28}/\Gamma_0) \tag{1}$$

Onde:

 $\alpha_{28IA}$  = grau de hidratação aos 28 dias;

A<sub>28</sub> = fração da área de grãos anidros presentes na pasta do concreto aos 28 dias de idade;

 $\Gamma_0$  = fração inicial de grãos anidros de cimento presentes na pasta do concreto.

Sendo  $\Gamma_0$  definido assim:

 $\Gamma_0 = C / (C + \rho_c.a)$  (2)

Onde:

C = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>) de concreto.

a = consumo de água por (kg/m<sup>3</sup>) de concreto.

 $\rho_c$  = massa específica real do cimento.

O procedimento para efetuar a análise das imagens também é baseado nos níveis de brilho, caracterizando e calculando as respectivas frações de áreas nas seguintes fases: anidros - que são pretos, produtos de hidratação - níveis de cinza e agregados que são brancos (Figura 3.12 e 3.13). Nesse caso são analisadas 10 imagens. Na ampliação de 100 X as áreas anidras menores que 3 μm são negligenciadas. Se comparadas com as mesmas imagens ampliadas 400 X, há uma diferença de 17% na área de grãos anidros. Portanto, ao se determinar o grau de hidratação com ampliação de 100 X, a fração da área de grãos anidros presentes na pasta do concreto (A<sub>28</sub>) deve ser acrescida em 17% (Mouret, 1997).



Figura 3.12 - Caracterização da fase anidra – Contorno na fase mais escura (Mouret, 1997).



Figura 3.13 - Caracterização da fase dos agregados - Contorno na fase mais clara (Mouret, 1997).

#### 3.4 Produtos de hidratação observados ao MEV

Na seqüência estão relacionadas as quatro principais fases sólidas presentes na pasta de cimento e que podem ser observadas ao microscópio eletrônico de varredura.

#### 3.4.1 Silicato de cálcio hidratado

Esta fase é conhecida por C-S-H, e constitui 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo, conseqüentemente, a mais importante na determinação das propriedades mecânicas e na durabilidade da pasta.

O silicato de cálcio hidratado apresenta diferentes estequiometrias, podendo-se encontrar o C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ou C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> (Mehta e Monteiro, 1994). O C-S-H apresenta variações na morfologia. O primeiro tipo é o C-S-H tipo 1, que tem uma morfologia parecida com espinhos ou agulhas. Ocorre nas primeiras idades porque existe mais espaço e predomina em pastas de silicato de cálcio puro. O segundo tipo é o C-S-H tipo 2, que se assemelha a um reticulado cristalino ou favos de mel, ocorrendo essa forma quando há CaCl<sub>2</sub>, sendo muito raro em pastas puras. E o terceiro, C-S-H tipo 3, formado quando há pouco espaço entre os grãos ou hidratos, predomina em pastas com idades mais avançadas. Os três tipos de C-S-H são mostrados na Figura 3.14. Há ainda o C-S-H do tipo 4, formado apenas quando há muito pouco espaço, e a mobilidade iônica é baixa. A diferença entre o tipo 3 e o tipo 4 é muito pequena (Taylor, 1992). A relação C/S varia em torno de 1,5 a 2, por isso sua designação usual é C–S–H. A temperatura pode ter influência sobre os produtos de hidratação dos silicatos, bem como as impurezas presentes no clínquer (Lea, 1970, Taylor, 1992).



C-S-H tipo 1\* C-S-H tipo 2\* Figura 3.14 - Imagens obtidas ao MEV do CSH tipo I, II e III.

C-S-H tipo 3\*\*

\* (Mindess e Young 1981), \*\* (Jawed et al., 1983).

As propriedades físicas do C-S-H variam de acordo com o método de análise. A superfície específica varia de acordo com a técnica de medida, e situa-se entre 200 a 400 m<sup>2</sup>/g. Além da elevada superfície específica, os silicatos de cálcio hidratados apresentam uma capacidade de adesão elevada, aderindo fortemente aos outros materiais existentes no concreto. A massa específica aparente varia, em média, entre 2,1 a 2,2 g/cm<sup>3</sup>. O tamanho dos poros depende da extensão e modo de secagem. A resistência à deformação pode ser ligada à idade, e é atribuída às forças de Van-der-Waals (Mehta e Monteiro, 1994).

Devido às suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, os cristais de C-S-H puderam ser observados somente com o advento do microscópio eletrônico. O material é freqüentemente citado como gel de C-S-H na literatura internacional. A estrutura cristalina interna do C-S-H também não é totalmente distinguível. Ela foi anteriormente assumida como sendo semelhante à do mineral natural tobermorita, e chegou a ser denominada de gel tobermorita. Atualmente não se emprega essa definição.

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

#### 3.4.2 Hidróxido de cálcio

O hidróxido de cálcio é um produto da hidratação do cimento e que apresenta uma estrutura cristalina bem definida, conhecida como Portlandita. Representa cerca de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada (Mindess e Young, 1981; Mehta e Monteiro, 1994). Pode ser observado por microscópio eletrônico ou microscópio óptico devido à sua dimensão variar entre 0,01 a 0,10 mm. A sua forma é de grandes cristais hexagonais, por isso apresenta uma baixa superfície específica se comparado ao silicato de cálcio hidratado e ao sulfoaluminato de cálcio. A forma e o tamanho dos cristais são afetados pela temperatura de hidratação, espaço disponível e impurezas. Em contraste com o C-S-H, o hidróxido de cálcio é um composto com uma estequiometria bem definida.

A morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde formas não identificáveis até pilhas de placas hexagonais geometricamente bem definidas. Comparado ao C-S-H, o potencial de contribuição do hidróxido de cálcio para a resistência devido a forças de Van-der-Waals é limitado, conseqüência de uma superfície específica consideravelmente menor. Na Figura 3.15a é mostrada uma imagem secundária de CH com formato de placas hexagonais e na Figura 3.15b é mostrada uma imagem obtida por elétrons retroespalhados de CH com formas não definidas.

O hidróxido de cálcio é formado pela reação de hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$ . A reação do  $C_3S$  produz mais hidróxido de cálcio do que a reação do  $C_2S$ . A sua presença no concreto é indesejável, por ter a solubilidade maior do que a do C-S-H (Mehta e Monteiro, 1994).



\* (Andrade e Veiga, 1998), \*\* (Scrivener, 1989).

#### 3.4.3 Sulfoaluminatos de cálcio

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 10% a 20% de volume de sólidos na pasta endurecida e, conseqüentemente, desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade (Mindess e Young, 1981; Mehta e Monteiro, 1994). Durante os primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de etringita ( $C_6A \ \overline{S}_3H_{32}$ ). Na qual forma de cristais prismáticos aciculares. A etringita não tem uma estequiometria exata. Átomos de ferro e de silício podem substituir o átomo de alumínio em sua composição; por essa razão a etringita também é designada de fase Aft. A Figura 3.16 apresenta a etringita e o monossulfato hidratado.

Em pastas de cimento Portland comum, a etringita transforma-se em monossulfato hidratado, C<sub>4</sub>A  $\overline{S}H_{18}$  (Mehta e Monteiro, 1994) e C<sub>4</sub>A  $\overline{S}H_{12}$  (Jawed *et al.*, 1983), que se cristaliza em placas. O monossulfato também contém pequenas

quantidades de ferro e silício, os quais podem substituir o alumínio na estrutura cristalina. O monossulfato hidratado também é chamado de fase AFm.



Figura 3.16 - Imagem da etringita e do monossulfato hidratado (Mehta e Monteiro, 1994).

#### 3.4.4 Grãos de clínquer não hidratados

Dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação. As partículas de clínquer em cimentos Portland situam-se geralmente no intervalo de tamanho de 1 µm a 100 µm (Scrivener, 1989; Metha e Monteiro, 1994). Com a evolução da hidratação, primeiro são dissolvidas as partículas menores, as quais desaparecem do sistema; as partículas maiores tornam-se menores. Na Figura 3.17a é

mostrada uma imagem obtida por elétrons secundários de grão de cimento anidro, e na Figura 3.17b é mostrada uma imagem obtida por elétrons retroespalhados de seção polida de grãos de cimento anidro dispersos em resina.



(a) elétrons secundários (b) elétrons retroespalhados **Figura 3.17** - Imagens obtidas ao MEV de grão de cimento anidro (Scrivener, 1989).

# 3.4.5 Vazios na pasta endurecida

Além dos sólidos descritos anteriormente, a pasta contém diferentes tipos de vazios, os quais têm uma influência importante em suas propriedades.

O primeiro tipo é o espaço interlamelar, conhecido também como poros de gel. Feldman e Sereda, citados por Mehta e Monteiro (1994), sugerem que o espaço pode variar de 5 a 25 Å e que ele é responsável por 28% da porosidade capilar no C-S-H sólido. Outros autores citam valores que variam entre 5 e 100 Å (Mindess e Young, 1981; Neville, 1982; Jawed *et al.*, 1983). No entanto, esse tamanho de vazio é muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência e a permeabilidade da pasta. O espaço não ocupado pelo cimento anidro ou pelos produtos de hidratação consiste de vazios capilares, sendo o volume e o tamanho dos capilares determinados pela distância inicial entre as partículas de cimento. Alguns autores citam valores de 0,01 a 10 µm (Mindess e Young, 1981; Neville, 1982). Outros autores indicam que em pastas bem hidratadas e baixas relações água/cimento, os vazios capilares podem variar entre 3 a 5 µm; em pastas com relação água/cimento elevada, nas primeiras idades de hidratação, os vazios capilares podem atingir valores entre 10 e 50 µm (Mehta e Monteiro, 1994). Esses poros capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta. O volume total de uma mistura cimento-água permanece essencialmente inalterado durante o processo de hidratação. Os vazios capilares podem ser quantificados por dois métodos: o porosímetro por intrusão de mercúrio e a absorção de gases.

Os macroporos são vazios capilares com 50 nm de tamanho e são admitidos como sendo prejudiciais à resistência e à impermeabilidade, enquanto que os vazios menores que 50 nm, referidos como microporos, e interferem na retração por secagem e a fluência (Mehta e Monteiro, 1994).

Há a possibilidade de se incorporar poros muito pequenos na pasta por meio de aditivo incorporador de ar. Nesse caso, o ar pode ser aprisionado na pasta de cimento fresca durante a operação de mistura. Os vazios de ar incorporado variam entre 50 e 200 μm. Conseqüentemente, tanto os vazios do ar aprisionado, como do ar incorporado na pasta são muito maiores do que os vazios capilares, podendo em alguns casos afetar negativamente a sua resistência e impermeabilidade. A Figura 3.18 mostra o intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida. A Tabela 3.2 apresenta uma classificação do tamanho de poros para a pasta de cimento endurecida.



Figura 3.18 - Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida (Mehta e Monteiro, 1994).

Tabela 3.2 - Classificação dos tamanhos de poros na pasta de cimento endurecida (Feldman e<br/>Cheng-Yi, citados por Silva, 2000).

| Terminologia           | Diâmetro     | Descrição                 | Função da água                                | Propriedades<br>afetadas  |
|------------------------|--------------|---------------------------|---|---|
| Macroporos             | 1000 – 15 μm | Vazios<br>grandes         | Comporta-se como<br>água livre                | Resistência e<br>permeabilidade                                   |
|                        | 15 – 0,05 μm | Capilares<br>grandes      | Comporta-se como<br>água livre                | Resistência e<br>permeabilidade                                   |
| Poros<br>capilares     | 50 – 10 nm   | Capilares<br>médios       | Provoca<br>moderadas tensões<br>superficiais  | Resistência e<br>permeabilidade;<br>retração à umidade<br>elevada |
|                        | 10 – 2,5 nm  | Poros de gel              | Provoca fortes<br>tensões superficiais        | Retração até 50%<br>de UR   |
| Espaço<br>interlamelar | 2,5 – 0,5 nm | Microporos                | Água fortemente<br>adsorvida                  | Retração e<br>deformação lenta                                    |
|                        | <0,5 nm      | Espaços<br>interlamelares | Água estrutural,<br>envolvida nas<br>ligações | Retração e<br>deformação lenta                                    |

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SECÃO CIRCUM ANTE

# 3.4.6 Água na pasta endurecida

Observados ao microscópio eletrônico, os poros na pasta parecem vazios. Isso resulta da técnica de preparo da amostra, da qual consta a sua secagem sob vácuo. Na realidade, dependendo da umidade do ambiente e da sua porosidade, a pasta de cimento não hidratada é capaz de reter uma grande quantidade de água. Do mesmo modo que as fases sólidas e os vazios, a água pode estar presente na pasta de várias formas. A classificação da água em diversos tipos está baseada na dificuldade ou na facilidade com a qual ela pode ser removida. Uma vez que existe uma perda contínua de água de uma pasta de cimento saturada, com a diminuição da umidade relativa, a linha divisória entre os diferentes estados da água não é rígida. Além do vapor nos poros, a água existe na pasta em quatro estados (Mehta e Monteiro, 1994):

- a) Água capilar, que está presente nos vazios maiores que 50 Å, pode ser descrita como sendo o volume de água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida;
- b) Água adsorvida, que está próxima à superfície dos sólidos, isto é, sob a influência de forças de atração, as moléculas de água estão fisicamente adsorvidas ou retidas nas superfícies dos sólidos na pasta. Desde que as energias de ligação de moléculas individuais de água diminuem com a distância com relação à superfície do sólido, uma porção maior da água absorvida pode ser perdida por secagem da pasta a 30% de umidade relativa, causando, principalmente, retração na pasta por secagem (Mehta e Monteiro, 1994);
- c) Água interlamelar ou intersticial, que está associada à estrutura do C-S-H, está fortemente ligada por pontes de hidrogênio. Essa água é perdida somente por secagem forte. A estrutura do C-S-H retrai consideravelmente quando a água interlamelar é perdida;

 d) Água quimicamente combinada, é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Essa água não é perdida por secagem; é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento.

Na Figura 3.19 são mostrados alguns tipos de água existentes na pasta endurecida. A água capilar é a água presente nos vazios de grande dimensão; a água fisicamente adsorvida é a que está próxima à superfície e a água interlamelar é a que está entre as lâminas de C-S-H.



Figura 3.19 - Água na pasta endurecida e estruturas de C-S-H (Feldman e Sereda, citados em Mehta e Monteiro, 1994).

#### 3.4.7 Zona de transição

A zona de transição do concreto é a interface do agregado com a pasta de cimento, com espessura de aproximadamente 50 μm. Embora sejam constituídas dos mesmos elementos, a estrutura e as propriedades da zona de transição diferem dagueles correspondentes à matriz da pasta (Mehta e Monteiro, 1994).

Após a moldagem e o adensamento do concreto, uma película de água formase ao redor das partículas, principalmente na região inferior do agregado. Isso leva a uma relação água/cimento mais elevada nas proximidades do agregado do que na matriz. Devido à relação água/cimento mais elevada, os cristais de etringita e, principalmente, de hidróxido de cálcio, tendem a ser maiores e orientados perpendicularmente à superfície do agregado. Portanto, formam uma estrutura mais porosa na zona de transição do que na matriz da pasta, tornando uma região mais frágil com facilidade de propagação de fissuras (Mehta e Monteiro, 1994).

As Figuras 3.20 a 3.24 apresentam a evolução dos modelos da zona de transição. É interessante observar que todos mostram uma maior quantidade de hidróxido de cálcio e uma estrutura menos densa do que a matriz da pasta.

Na Figura 3.20 é mostrado o modelo de Barnes de 1980, onde a zona de transição formada inicialmente por um filme duplo de cristais de CH e de C-S-H e depois uma região de grande porosidade composta de CH, C-S-H e grãos de cimento. Na Figura 3.21 encontra-se o modelo de Ollivier e Grandet de 1982, onde é mostrada uma zona de transição com cristais de CH com orientação aleatória, C<sub>3</sub>S e C<sub>3</sub>A e seus produtos de hidratação, o C-S-H e a etringita, respectivamente. A Figura 3.22, no modelo de Zimbelman de 1985, mostra que junto ao agregado há uma camada de cristais de CH orientada, depois uma região intermediária com presença de mais CH, etringita e C-S-H. Na Figura 3.23, o modelo de Monteiro de 1986, onde também há uma região de transição com a presença de CH aleatório, C-S-H, etringita e grãos de cimento. A Figura 3.24 apresenta o modelo de Metha e Monteiro de 1994, em que há uma zona de transição com muitos cristais de CH, muita etringita e pouco C-S-H; observa-se que essa região vai se densificando em direção à matriz de pasta de cimento devido à maior presença de C-S-H e menor presença de CH e etringita.



Figura 3.20 - Estrutura da zona de transição - Modelo de Barnes de 1980 (Barnes *et al.*, citados por Breton, 1993).



Figura 3.21 - Estrutura da zona de transição - Modelo de Ollivier e Grandet de 1982 (Ollivier e Grandet, citados por Breton, 1993).



Figura 3.22 - Estrutura da zona de transição - Modelo de Zimbelman de 1985 (Zimbelman, citado por Breton, 1993).



Figura 3.23 - Estrutura da zona de transição - Modelo de Monteiro de 1986 (Monteiro, citado por Breton, 1993).


Figura 3.24 - Estrutura da zona de transição - Modelo de Mehta e Monteiro, 1994.

Após a mistura do concreto, um filme de água forma-se ao redor das partículas de agregado, e quanto mais chatas e alongadas forem as partículas, maior será a tendência da água acumular-se na região de interface. Depois disso, os íons sulfato, íons alumínio e cálcio, que são mais móveis do que os outros íons, propagam-se para a interface, formando a etringita e a portlandita. Em conseqüência da maior disponibilidade de espaço e água, os cristais de etringita e portlandita apresentam um tamanho maior, além de apresentar uma orientação preferencial, que é perpendicular à superfície de agregado. Devido a esses fatores, a zona de transição é mais fraca do que a matriz de cimento hidratado.

Além da grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio orientados e de vazios capilares, um outro fator responsável pelas características da zona de transição é a presença de microfissuras. A quantidade de microfissuras depende de vários fatores: a distribuição granulométrica, o tamanho dos agregados, o teor de cimento, a relação água/cimento, o grau de adensamento, as condições de cura, umidade e temperatura do ambiente. Isso significa que o concreto apresenta microfissuras mesmo antes da estrutura ser carregada. Cargas de impacto e carregamentos têm como efeito o aumento do tamanho e quantidade de microfissuras.

Uma vez iniciada a fissuração, esta se propaga de uma zona de transição à outra, na maioria dos casos contornando os agregados (Figura 3.25), porém essa fissuração pode ser proveniente da preparação das amostras.



Figura 3.25 - Ruptura do concreto na interface matriz - agregado (Skalny, 1989).

Entretanto, com o aumento da idade, as características da zona de transição podem ser melhoradas. Algumas adições minerais, nas quais ocorrem reações químicas que consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H, contribuem diminuindo essa estrutura porosa, tornando-a mais densa e melhorando a aderência com os agregados. As Figuras 3.26 (a) e (b) mostram as diferenças na zona de transição em amostras de concreto com 28 dias.





(a) Concreto sem adições. 1: Superfície em contato com o agregado,

- 2: matriz da pasta,
- 3: vazios,
- 4: camada de CH,
- 5: microfissuras.

Figura 3.26 - Amostra da zona de transição de concretos sem e com adições (Mindess, 1989).

## **4 CURA DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

Cura é o nome dado aos procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento, e consistindo de num controle da temperatura e das condições de umidade, imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas (Neville, 1982).

O objetivo da cura é manter o concreto saturado, até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos de hidratação do cimento. Além disso, a cura úmida ajuda a controlar a temperatura do concreto durante um período de tempo suficiente, até que este alcance o nível de resistência desejado. Uma das necessidades da cura é devido ao fato de que a hidratação do cimento só pode se efetuar nos capilares cheios de água, e por esse motivo deve ser evitada a perda prematura de água (Mindess e Young, 1981; Neville,1982; Mehta e Monteiro, 1994).

A falta de uma cura adequada, além de reduzir a resistência à compressão, age principalmente contra a durabilidade das estruturas, a qual é inicialmente controlada pelas propriedades das camadas superficiais desse concreto. Secagens prematuras resultam em camadas superficiais porosas com baixa resistência ao ataque dos agentes agressivos (Levy e Helene, 1996).

A evaporação da água do concreto, logo após a aplicação, depende da temperatura ambiente, da umidade do ar e da velocidade do vento sobre a superfície do concreto, além do calor de hidratação do cimento Portland e de suas adições.

Existem vários métodos de cura, dependendo das condições locais, da forma, dimensões e posição dos elementos. A cura pode ser feita por imersão da peça em água, com aspersão de água sobre as peças, cobrindo as peças com areia, serragem, ou outro material, mas sempre mantendo a superfície úmida, com uma pintura selante e impermeável, cura térmica por imersão em água, cura térmica em atmosfera saturada de vapor à pressão atmosférica ou em autoclave, ou também pelo aquecimento do concreto por métodos elétricos, aproveitando gases de combustão com ou sem umidificação, entre outros (Mindess e Young, 1981; Neville, 1982; Mehta e Monteiro, 1994).

### 4.1 Cura úmida



Deve ser lembrado que as relações idade-resistência do concreto geralmente supõem condições de cura úmida e temperatura ambiente. Para uma dada relação água/cimento, quanto maior o período de cura úmida maior será à resistência. O período de cura não pode ser prescrito de maneira simplista, mas é usual que se especifique um período mínimo para os concretos de cimento Portland comum, embora se saiba que a temperatura também afeta a duração do período de cura (Neville, 1982; Mehta e Monteiro, 1994).

A água é parte integrante do processo de hidratação do cimento Portland e, conseqüentemente, não pode ser perdida. Portanto, quando uma mistura corretamente dosada é seguida de cura úmida durante os primeiros estágios de endurecimento, será conferido ao concreto as melhores condições para se tornar um material com baixa permeabilidade, com baixa absorção de água, alta resistência à carbonatação e à difusão de íons, e com resistência mecânica e durabilidade adequadas (Mehta e Monteiro, 1994; Levy e Helene, 1996).

A umidade mantida pela cura exerce influência na resistência do concreto. Se ela não for realizada, a retração por secagem causa microfissuração na zona de transição, e uma diminuição da resistência ocorrerá, por exemplo, em peças esbeltas quando estão submetidas à secagem ao ar. Recomenda-se um período mínimo de sete dias para concretos com cimento Portland comum, mas para concretos contendo cimento Portland composto ou com adição mineral, é desejável iniciar a cura logo após o lançamento do concreto e manter a cura por um período mais longo, a fim de garantir a contribuição da resistência pelas reações das adições (Neville, 1982; Mehta e Monteiro, 1994). A cura úmida iniciada logo após o lançamento do concreto deve ser o mais prolongada possível para o concreto com escória, porque a hidratação inicial lenta resulta em um sistema de poros capilares que permite a perda de água em condições de secagem.

Quando se fala na duração da cura é preciso levar em conta as exigências técnicas, pois deve inicial o mais rápido possível além do que ela deve ser a mais longa possível; e as exigências econômicas, que tendem a restringí-la ao máximo. Na prática, no processo de produção de elementos pré-moldados, verifica-se, em geral, uma negligência em relação ao primeiro aspecto. As exigências econômicas têm preponderado sobre as técnicas e se tem efetuado desmoldagem de elementos estruturais pré-moldados, com resistências não superiores a 4 Mpa, após 12 a 18 horas. Esse procedimento compromete seriamente a qualidade dos produtos por causa das baixas resistências, fazendo com que posteriormente se criem verdadeiras "enfermarias" na linha de produção, que não corrigem, mas só mascaram os defeitos (Bauer, 1987).

Para definir o prazo de cura, é necessário considerar a relação água/cimento e o tipo de cimento. Para cimentos nacionais o período de cura pode variar de dois a dez dias (Tabela 4.1).

| Cimento \ a/c | 0,35 | 0,55 | 0,65 | 0,70 |
|---------------|------|------|------|------|
| CPIell 32     | 2    | 3    | 7    | 10   |
| CP IV 32      | 2    | 3    | 7    | 10   |
| CP III 32     | 2    | 5    | 7    | 10   |
| CP II E 40    | 2    | 3    | 5    | 5    |
| CP V ARI      | 2    | 3    | 5    | 5    |

Tabela 4.1 - Tempo mínimo de cura, em dias, em função do tipo de cimento e da relaçãoágua/cimento (Levy e Helene, 1996).

Na Tabela 4.2 é apresentada uma recomendação japonesa do período mínimo de cura para cimentos com adição de escória.

 Tabela 4.2 - Recomendação japonesa do período de cura dos cimentos com adição de escória (JSCE, citado por Neville, 1982).

| Temperatura °C | Período mínimo de cura úmida (dias) em função do teor de escória (%) |         |         |
|----------------|--|---------|---------|
|                | 30 a 40  | 40 a 55 | 55 a 70 |
| >17            | 5  | 6       | 7       |
| 10 a 17        | 7  | 8       | 9       |
| 5 a 10         | 9  | 10      | 11      |

Portanto, para definir o período de cura úmida, deve-se sempre levar em conta o teor de adição do cimento, a relação água / cimento e as condições locais. Além disso, a cura deve iniciar o mais rápido possível, ou seja imediatamente o lançamento, e a duração deve ser a mais longa possível, para se obter uma maior durabilidade do concreto.

#### 4.2 Cura térmica

Cura térmica é o procedimento adotado para promover a hidratação do concreto utilizando uma temperatura maior do que a do ambiente, aumentado dessa forma a velocidade das reações de hidratação, com objetivo de obter resistência mecânica suficiente para que o concreto possa ser desmoldado e utilizado.

Quando as argamassas ou concretos são submetidos à cura térmica, acelerase a cinética das reações de hidratação, aumentando a velocidade de endurecimento (Camarini, 1995; Camarini e Cincotto, 1996; Silva, 1998). Sabe-se que uma elevação na temperatura de cura acelera as reações de hidratação, influenciando de maneira favorável as resistências do concreto nas primeiras idades. No entanto, uma temperatura de cura elevada aumenta a resistência inicial mas compromete a resistência final do concreto, pois uma hidratação inicial rápida resulta numa estrutura mais pobre, mais porosa, numa distribuição mais desuniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta (Mindess e Young, 1981; Neville,1982; Mehta e Monteiro, 1994).

Concretos e argamassas, curados à temperatura ambiente, têm tempo suficiente para ocorrer a melhor distribuição e precipitação de produtos de hidratação (Camarini, 1995; Camarini e Cincotto, 1996; Silva, 1998).

A cura térmica no vapor e à pressão atmosférica é desenvolvida com temperaturas entre 40 e 80 °C, e o ciclo de cura (Figura 4.1) deve seguir os seguintes períodos (Camarini, 1995):

(t<sub>0</sub>) Espera: período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve ser igual ao tempo de início de pega. Esse regime é variável em função do tipo de aglomerante empregado.

- (t<sub>1</sub>) Elevação da temperatura: Deve ser controlada até atingir o valor desejado. O gradiente recomendado é de 20 °C/h.
- (t<sub>2</sub>) Regime isotérmico: Período em que a temperatura desejada deve ser mantida por algumas horas.
- (t<sub>3</sub>) Esfriamento: É a diminuição da temperatura até atingir a temperatura ambiente. O gradiente recomendado é de 20 °C/h.



Figura 4.1 - Ciclo de cura térmica (Camarini, 1995).

O aumento da temperatura de cura acelera fortemente o desenvolvimento de resistência mecânica nos cimentos de escória, sendo possível alcançar imediatamente após o ciclo de cura cerca de 70 a 80% da resistência de 28 dias de idade (Camarini, 1995; Camarini e Cincotto, 1996; Silva, 1998).

Um aspecto importante a ser observado quando se aplica a cura térmica é que a partir de um grau de hidratação próximo a 30%, a velocidade de hidratação é controlada pela difusão iônica através da camada de compostos hidratados que vão se depositando ao redor dos grãos anidros. Outro aspecto importante é que a energia de ativação num processo quimicamente controlado (processo de dissolução-precipitação) é superior a um processo controlado por difusão, que praticamente independe da temperatura. Portanto, o melhor momento de se aplicar a cura térmica é nos primeiros estágios da hidratação, particularmente logo após o início da pega, onde o mecanismo é quimicamente controlado pela dissolução-precipitação (Camarini, 1995). A temperatura de cura (até 70 °C), tanto para o cimento Portland comum como para o cimento Portland de alto-forno, não influencia os compostos hidratados, mas aumenta a quantidade de material não hidratado. Isso pode ser principalmente justificado pela provável formação de material hidratado ao redor dos grãos anidros, dificultando a difusão dos íons, o que dificulta o prosseguimento da hidratação (Camarini, 1995; Silva, 1998). Com o aumento da temperatura de cura, há um aumento de porosidade; esta tendência também é conseqüência da concentração de compostos hidratados ao redor dos grãos anidros do cimento, que dificulta o prosseguimento da hidratação hidratados ao redor dos grãos anidros do cimento, que dificulta o prosseguimento da hidratação (Camarini, 1995; Silva, 1998).

#### 4.3 Características dos concretos submetidos à cura térmica

O objetivo principal da cura térmica é obter uma resistência inicial suficientemente alta de modo que os produtos de concreto possam ser manuseados o mais cedo possível após a moldagem, o que pode significar um ganho econômico.

O benefício imediato da cura térmica é o de acelerar a resistência inicial do concreto. Observa-se que em períodos com manutenção de elevada temperatura, a cura térmica é prejudicial. A distribuição dos produtos de hidratação é mais uniforme em pastas curadas com temperaturas mais baixas, enquanto que para temperaturas de cura mais elevadas os produtos de hidratação desenvolvem-se com uma estrutura mais desuniforme e com mais poros interconectados, apresentando uma diminuição nas propriedades mecânicas e um aumento na permeabilidade (Patel *et al.*, 1995; Cao e Detwiler, 1995; Kjellsen, 1996).

A temperatura no início do endurecimento tem influência na resistência. Por isso deve-se procurar um ciclo que permita obter uma resistência inicial alta e uma resistência a longo prazo também alta.

O cimento Portland de alta resistência inicial tem sido muito usado, principalmente na indústria de pré-moldados. Esse cimento, quando submetido a um ciclo de cura térmica adequado, tem um ganho considerável de resistência inicial sem sofrer perdas significativas em idades avançadas.

As reações de hidratação dos cimentos com escória têm sua velocidade controlada principalmente pela reatividade da escória, tipo e concentração do ativador e temperatura (Camarini, 1995; Silva, 1998).

A Figura 4.2 apresenta as curvas calorimétricas de quatro tipos de cimento Portland submetidos à cura normal a 23 °C e cura térmica a 60 °C.

Na cura a 23 °C, o calor de hidratação total liberado diminui com o aumento do teor de escória. O cimento Portland comum apresenta um único pico de liberação máxima de calor, mas os cimentos de alto-forno apresentam dois picos: o primeiro pico corresponde à hidratação do clínquer e o segundo à hidratação da escória.

Na cura a 60 °C, a curva calorimétrica apresenta um único pico, com maior liberação de calor em tempo menor, evidenciando a aceleração das reações de hidratação do clínquer e da escória, sendo esta última mais beneficiada pela cura térmica do que o clínquer.



Figura 4.2 - Curvas de tempo X taxa de liberação de calor (Camarini e Cincotto, 1996).

#### 4.4 Microestrutura do concreto

Com a evolução da hidratação, algumas diferenças na microestrutura são visíveis. A Figura 4.3 mostra as diferenças nas imagens retroespalhadas de pastas hidratadas durante 14 horas e após 7 dias. A pasta hidratada durante 14 horas apresenta grandes grãos de cimento não hidratados (em branco), enquanto que na pasta hidratada por 7 dias esses grãos são bem menores, com muito mais material hidratado (em cinza) (Kjellsen e Atlassi, 1998).





(b) 7 dias

Figura 4.3 - Imagens retroespalhadas de pasta de cimento com relação água/cimento de 0,55. (Kjellsen e Atlassi, 1998).

A temperatura de cura também pode influenciar na microestrutura. Concretos curados com temperaturas entre 16 e 46 °C praticamente não apresentam diferenças na microestrutura, enquanto que concretos curados a 85 °C apresentam um grau de microfissuração maior do que aqueles curados a 16 °C, o que aumenta a mobilidade da umidade no concreto (Patel *et al.*, 1995).

Temperaturas maiores que 70 °C podem influenciar a formação de etringita, a qual, em idades mais avançadas, resulta em uma expansão destrutiva. Outro efeito causado pelo rápido crescimento da temperatura é a diferença das propriedades térmicas dos constituintes, resultando também em uma estrutura mais porosa (Kjellsen, 1996).

A diferença de porosidade pode ser verificada nas Figuras 4.4 e 4.5, pela quantidade de áreas escuras, que são os vazios nas imagens. Na Figura 4.4 a cura foi de imersão em água a 20 °C, e na Figura 4.5 a cura foi térmica a 65 °C, seguida de cura ao ar por 27 dias.



Figura 4.4 - Cura em água a 20 °C durante 27 días (Kjellsen, 1996).



Figura 4.5 - Cura térmica a 65 °C, seguida de cura ao ar durante 27 dias (Kjellsen, 1996).

Em pastas com temperaturas de cura mais elevadas, a maior parte do hidróxido de cálcio é encontrado agrupado e mais adensado, ao contrário do que ocorre quando do uso de temperaturas mais baixas, nas quais a pasta apresenta uma distribuição uniforme de pequenos cristais na matriz (Patel *et al.*, 1995).

Os concretos curados com temperatura mais alta apresentam grandes cristais de hidróxido de cálcio e grandes agulhas de etringita nas microfissuras, na interface pasta/agregado e nos vazios, indicando que essas regiões apresentam uma relação água/cimento maior (Patel *et al.*, 1995).

Em pastas de cimento sem adição e com adição de escória (30%), curadas a 23 °C e 70 °C observou-se que, com grau de hidratação de 70%, as pastas curadas a 23 °C apresentam um bom desenvolvimento de CSH ao redor dos grãos de cimento; a matriz é mais densa e a estrutura de poros é mais descontínua (Figura 4.6a). As pastas curadas a 70 °C apresentam uma estrutura com maior quantidade de poros de grande dimensão (Figura 4.6b) (Cao e Detwiler, 1995).





b) 70 °C

Figura 4.6 - Pastas de cimento com 70% de hidratação curadas à 23 °C e 70 °C (Cao e Detwiler, 1995).

Baseando-se na análise das imagens, observa-se que realmente uma temperatura de cura mais elevada conduz a uma estrutura com vazios maiores, e que a adição de escória pode minimizar esses efeitos resultando em uma estrutura de poros menos conectados (Cao e Detwiler, 1995).

**UNICAMP** BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

# **5 TRABALHO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo apresentam-se os materiais empregados e os métodos de ensaio utilizados durante o trabalho experimental.

## 5.1 Caracterização dos materiais

# 5.1.1 Cimentos

Os cimentos utilizados no estudo experimental foram: Cimento Portland de alta resistência inicial – CPV-ARI (CPV-ARI RS e CPV-ARI PLUS), e o Cimento Portland de alto-forno – CP III. A caracterização dos cimentos utilizados foi feita pela indústria que forneceu o cimento, e está mostrada na Tabela 5.1.

### 5.1.2 Agregados

Para a realização das dosagens foram usados agregados miúdo e graúdo disponíveis na região de Campinas. As características dos agregados estão descritas na Tabela 5.2.

| Cimento                               | CP-V ARI RS | CP-V ARI PLUS | CP-III |
|---------------------------------------|-------------|---------------|--------|
| Clínquer (%)                          | 65,0        | 90,6          | 37,9   |
| Escória (%)                           | 27,3        | -             | 53,4   |
| Sulfato de cálcio (%)                 | 4,4         | 6,0           | 4,4    |
| Material carbonático (%)              | 3,4         | 3,4           | 4,3    |
| Perda ao fogo (%)                     | 2,68        | 2,68          | 3,01   |
| Resíduo insolúvel (%)                 | 0,48        | 0,39          | 0,75   |
| SiO <sub>2</sub> (%)                  | 22,61       | 19,58         | 25,93  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)    | 6,66        | 4,96          | 8,38   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)    | 2,68        | 3,14          | 2,09   |
| CaO (%)                               | 58,82       | 64,65         | 51,53  |
| MgO (%)                               | 2,17        | 0,54          | 3,78   |
| SO <sub>3</sub> (%)                   | 2,63        | 2,87          | 3,68   |
| Na <sub>2</sub> O (%)                 | 0,05        | 0,06          | 0,14   |
| K <sub>2</sub> O (%)                  | 0,65        | 0,75          | 0,55   |
| Módulo de sílica                      | 2,42        | 2,42          | 2,48   |
| Módulo de alumina                     | 2,49        | 1,58          | 4,01   |
| Fator de saturação de cal             | 68,0        | 88,7          | 34,5   |
| Composição potencial dos cimentos:    |             |               |        |
| C <sub>3</sub> S (%)                  | 43,5        | 56,7          | 21,0   |
| C <sub>2</sub> S (%)                  | 9,0         | 11,7          | 5,0    |
| C <sub>3</sub> A (%)                  | 6,2         | 8,1           | 3,2    |
| C <sub>4</sub> AF (%)                 | 7,2         | 9,5           | 3,5    |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,05        | 3,10          | 2,97   |
| Tempos de início de pega (min)        | 140         | 120           | 160    |
| Finura Blaine (cm²/g)                 | 4720        | 4650          | 4050   |

Tabela 5.1 - Características, composição química e potencial dos cimentos.

A composição potencial foi calculada em função do teor de clínquer presente em cada cimento. Fonte: Holdercim Brasil S.A. Tabela 5.2 - Caracterização dos agregados.

| Material             | Areia       | Brita   |  |
|----------------------|-------------|---------|--|
| Dimensão máxima (mm) | 6,3         | 19,0    |  |
| Módulo de finura     | 3,0         | 6,6     |  |
| Caracterização       | Areia média | Brita 1 |  |

As curvas granulométricas da areia e da brita são mostradas respectivamente nas Figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1 - Curva granulométrica da areia.



Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita.

# 5.1.3 Aditivo plastificante

Utilizou-se um aditivo plastificante, o Reax 3000A, à base de melamina, que apresentou 27% de sólidos e massa específica de 1,275 g/cm<sup>3</sup>.

## 5.2 Misturas experimentais

A dosagem do concreto empregada foi a mesma para os três tipos de cimento e para os dois tipos de cura, sendo mostrada na Tabela 5.3.

| Traço | Relação a/c | Consumo de cimento | Teor de aditivo         |  |
|-------|-------------|--------------------|-------------------------|--|
|       |             | (kgm³)             | (% da massa de cimento) |  |
| 1:2:3 | 0,42        | 375                | 0,3                     |  |

Tabela 5.3 - Dosagem do concreto empregada.

## 5.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova cilíndricos, de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, foram moldados segundo as instruções da NBR 5738/94, sendo vibrados durante 15 segundos na mesa vibratória. Utilizou-se dois tipos de cura:

 a) cura úmida por 7 dias: onde os corpos-de-prova permaneceram nos moldes por um período de 24 h, seguido de cura por imersão em água em temperatura ambiente por um período de 6 dias. Depois de retirada da imersão, os corpos-de-prova ficaram em ambiente de laboratório até a data do ensaio.

- b) cura térmica: empregando um ciclo de cura térmica no vapor e à pressão atmosférica, conforme a Figura 5.3. O ciclo de cura seguiu os seguintes períodos (Camarini, 1995):
- t<sub>0</sub>) Espera: período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve ser igual ao tempo de início de pega. Esse regime é variável em função do tipo de aglomerante empregado.
- t<sub>1</sub>) Elevação da temperatura: Deve ser controlado até atingir o valor desejado. O gradiente recomendado (G<sub>1</sub>) é de 20 °C/h.
- t<sub>2</sub>) Regime isotérmico: Período em que a temperatura desejada foi mantida por duas horas.
- t<sub>3</sub>) Esfriamento: É a diminuição da temperatura, até atingir a temperatura ambiente. O gradiente recomendado (G<sub>2</sub>) é de 20 °C/h.

Para cada tipo de cimento o tempo t<sub>0</sub> variou de acordo com o tempo de início de pega. Conforme a Tabela 5.1.

A câmara de cura térmica utilizada é mostrada na Figura 5.4. Essa câmara permite que os corpos-de-prova fiquem num ambiente de vapor, na temperatura desejada, durante todo o ciclo de cura térmica.



Figura 5.3 - Ciclo de cura térmica utilizado neste trabalho experimental (Camarini, 1995).



Figura 5.4 - Câmara de cura térmica (Camarini, 1995).

A Tabela 5.4 apresenta os dois tipos de cura e os três tipos de cimento.

| Série | Tipo de cimento | Ciclo de cura  |
|-------|-----------------|----------------|
| CI 1  | CP V ARI - RS   | imersão 7 dias |
| CT 1  | CP V ARI - RS   | térmica        |
| CI 2  | CP V ARI - PLUS | imersão 7 dias |
| CT 2  | CP V ARI - PLUS | térmica        |
| CI 3  | CP III          | imersão 7 dias |
| CT 3  | CP III          | térmica        |

Tabela 5.4 - Séries de concreto a serem ensaiadas.

# 5.2.2 Determinações físicas e mecânicas

Os ensaios realizados com as misturas no estado fresco foram os seguintes:

a) Ensaio de Abatimento de tronco de cone, NBR 7223/92 (ABNT, 1994).

Os ensaios realizados com as misturas no estado endurecido foram:

- a) Resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28, 56, 90, 180 dias cinco corpos-de-prova para cada idade, NBR 5739/94 (ABNT, 1994).
- b) Resistência à tração por compressão diametral nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias – dois corpos-de-prova para cada idade, NBR 7222/94 (ABNT, 1994).
- c) Determinação do módulo de elasticidade nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias dois corpos-de-prova para cada idade, NBR 8522/94 (ABNT, 1994).
- d) Absorção capilar nas idades de 28, 90 e 180 dias.

Para cada série, foi medida a absorção capilar em 4 corpos-de-prova de idade de 28 dias. Estes corpos-de-prova foram secos em estufa por 24 horas à temperatura de 50 °C e tiveram suas laterais impermeabilizadas com 2 camadas de verniz impermeabilizante. A Figura 5.5 mostra como os corpos-de-prova permaneceram durante o ensaio, com 1 cm de água acima de suas bases, durante 24 horas. Neste período foram feitas diversas leituras de variação de massa e, no final do ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos diametralmente para que fosse medida a altura de penetração da água.



Cilindro de concreto (10X20 cm)

Figura. 5.5 - Esquema do ensaio de absorção capilar (Balayssac, 1992).

O valor da ascensão capilar foi calculado pela seguinte equação:

$$S = \frac{1}{\sqrt{\frac{t}{z^2}}}$$
(3)

Sendo:

S = ascensão capilar (m.s<sup>-1/2</sup>);

t = tempo de ensaio (s);

z = altura de penetração da água (m).

Calculou-se também o coeficiente de absorção capilar, k<sub>abs</sub>, com os dados da primeira hora de ensaio.

$$k_{abs} = \frac{\left(W_t - W_o\right)/A_m}{\sqrt{t}}$$
(4)

Sendo:

k<sub>abs</sub> = coeficiente de absorção capilar (kg/m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>);
W<sub>o</sub> = massa inicial do corpo-de-prova (kg);
W<sub>t</sub> = massa do corpo-de-prova no tempo de ensaio (kg);
A<sub>m</sub> = área transversal do corpo-de-prova (m<sup>2</sup>)

e) Determinação da permeabilidade ao ar nas idades de 28, 90 e 180 dias.

O ensaio de permeabilidade ao ar realizado foi desenvolvido pelo Laboratório de Materiais e Durabilidade das Construções LMDC do INSA-UPS, da França (Massat, 1991). Foram ensaiados dois corpos-de-prova para cada série nas idades de 28, 90 e 180 dias. Para tanto, os corpos-de-prova foram impermeabilizados com verniz nas

laterais, e colocados em um aparelho que permitia efetuar o ensaio de permeabilidade ao ar (Figura 5.6).

Com o corpo-de-prova devidamente instalado, a água do recipiente é sugada até a altura  $h_o$ . A válvula de pressão é fechada e o tempo que a água leva para descer do nível  $h_o$  até  $h_t$  é medido. O procedimento para determinar  $h_t$  de ensaio estabelece que:

$$\ln\!\left(\frac{h_o}{h_t}\right) = 1$$

O cálculo da permeabilidade ao ar é feito pela fórmula de Balayssac (1992):

$$k_{per} = \frac{\left(\mu \cdot s \cdot l\right)}{\left(A \cdot \gamma \cdot g \cdot t\right)} \tag{5}$$

Sendo:

 $K_{per}$  = permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>);

h<sub>o</sub> = altura inicial do nível da água (m);

h<sub>t</sub> = altura final da água, no tempo t (m);

$$\mu$$
 = viscosidade do ar a 20°C = 1,91 . 10-5 Poisseuille (Pa.s);

A = seção do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>);

$$g = gravidade (m/s^2)$$

- t = tempo de medida (s);
- I = altura do corpo-de-prova (m).



Figura 5.6 - Aparelho de medir a permeabilidade ao ar (Massat, 1991).

## 5.2.3 Grau de hidratação

As análises microscópicas foram efetuadas em seções polidas de amostras retiradas de dois corpos-de-prova de concreto endurecido aos 28, 90 e 180 dias.

Após a preparação das amostras (conforme Anexo A) foi realizada a observação no microscópio eletrônico, a imagem do tipo retroespalhada foi visualizada em um monitor. As imagens obtidas apresentam uma variação de 256 níveis de brilho, que são representados em tons de cinza; essas imagens são analisadas em um software de computador que calcula as áreas em uma escala escolhida.

O concreto foi considerado como sendo constituído essencialmente de compostos hidratados, grãos anidros de cimento e os agregados. As três áreas foram

caracterizadas e calculadas como uma porcentagem da área total da imagem. Os cálculos foram médias de dez imagens separadas, feitas de maneira aleatória sob a ampliação de 100 vezes (Mouret, 1997).

As amostras foram obtidas de corpos-de-prova cilíndricos 10X20 cm. Os corpos-de-prova foram cortados, obtendo-se uma fatia da porção central. Desta fatia foram analisadas ao MEV duas regiões, com tamanho máximo de 5 cm de diâmetro e 1 cm de altura (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Esquema das amostras de microscopia

As seções polidas de concreto endurecido foram preparadas no Laboratório de Laminação de Rochas do Instituto de Geociências da Unicamp. As amostras de concreto foram preparadas de maneira semelhante às amostras de rochas, e seguiram a seguinte seqüência:

 a) O corte foi feito em uma serra policorte diamantada de 18 polegadas, ficando a amostra num tamanho aproximado de um cubo de 2,0 cm de aresta. Depois, as mesmas foram cortadas em uma outra serra diamantada de 6 polegadas, ficando planas com 2,0 cm de comprimento, 1,5 cm de largura e 0,8 cm de altura.

- b) A amostra foi impregnada com uma resina epóxi que penetrava nos seus poros. Após 24 horas, foi feito o primeiro polimento com carbeto de silício nº. 320 durante, aproximadamente, 5 minutos em uma politriz com 150 rpm; em seguida faz-se e um segundo polimento com carbeto de silício nº. 600 por cinco minutos em outra politriz também com 150 rpm.
- c) A seguir, foram realizados polimentos com três pastas diamantadas em uma politriz com 200 rpm. O polimento com a primeira pasta, com granulometria de 7 μm, foi realizado durante 30 minutos, a segunda pasta, com granulometria de 3 μm, durante 30 minutos, e a terceira pasta, com granulometria de 1 μm, durante 30 minutos. Depois do polimento, as amostras passaram num equipamento de ultra-som durante 5 minutos para retirar o resíduo de pasta diamantada na superfície. Foram obtidas assim, amostras planas, lisas e com aspecto brilhante. No Anexo A detalhou-se a preparação das amostras.

No Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME), do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), foram obtidas as imagens utilizando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura JSM 5900 LV. Inicialmente, as amostras foram metalizadas com um filme de ouro. Esse filme tem, aproximadamente, 16 nm de espessura. A amostra foi levada ao microscópio eletrônico para as observações com ampliação de 100 X, com uma distância de trabalho de 15 mm, voltagem de 20 kV e *spotsize* (largura do feixe) igual a 50.

As imagens foram obtidas no formato "Tif" e armazenadas num "ZIP Disc", podendo ser visualizadas em qualquer software de editoração gráfica ou de visualização de imagens.

A caracterização das fases e o cálculo das áreas nas imagens foram feitos com um algoritmo desenvolvido pelo Prof. Dr. Roberto de Alencar Lotufo, do Departamento

de Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp. A caracterização da fase anidra, que é a parte mais clara, foi feita por um processo chamado de limiarização, onde o valor do limiar foi escolhido experimentalmente de forma interativa. A parte mais difícil foi à caracterização das fases de agregado e produtos de hidratação. Nesse caso foi utilizado um método que se baseou em critérios de textura, no qual os agregados foram identificados por regiões homogêneas. Esse algoritmo consta do Apêndice A.

De posse das imagens no formato "Tif", estas foram analisadas num software com o algoritmo desenvolvido pelo Prof. Lotufo. Esse algoritmo separou automaticamente as fases (Figura 5.8) e calculou a área de cada fase.



Figura 5.8 - Seleção da fase agregado (vermelho) e da fase grão anidro (verde). Exemplo de uma amostra de CP III na idade de 180 dias, após ser submetida à cura úmida por 7 dias.

Assumindo uma homogeneidade na distribuição dos grãos de cimento na pasta do concreto, o grau de hidratação baseado na análise de imagens é foi estimado seguindo a equação (1), citada na revisão bibliográfica.

## 5.2.4 Microfissuração

As imagens da microfissuração foram obtidas, a partir de seções polidas do centro e da superfície dos corpos-de-prova, no microscópio eletrônico de varredura utilizando o detector de elétrons retroespalhados. A ampliação foi de 200 X, com uma distância de trabalho de 15 mm, voltagem de 20 kV e *spotsize* (largura do feixe) igual a 50.

O processo utilizado para a caracterização da fase de microfissuração é chamado de limiarização. Da imagem original obtida ao microscópio, selecionou-se apenas as regiões mais escuras da imagem, correspondentes aos vazios e fissuras; essas regiões mais escuras foram determinadas de forma interativa e visual. Essas imagens tinham aproximadamente, 0,50 mm de altura por 0,70 mm de comprimento.

Os vazios e fissuras aparecem no nível mais escuro, podendo selecioná-los de modo a se obter uma imagem apenas com a presença desse nível, calculando a área correspondente. Essa análise foi feita apenas na idade de 180 dias, comparando-se os dois tipos de cura e as duas regiões analisadas, que correspondem ao centro e à superfície, para os tipos de cimento (Figuras 5.9 e 5.10).

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE



Figura 5.9 - Seleção da fase fissuras e vazios (preto). Exemplo de uma amostra do centro de CP III na idade de 180 dias, após ser submetida à cura úmida por 7 dias. Área de vazios = 1%



Figura 5.10 - Imagem original da Figura 5.9 Exemplo de uma amostra do centro de CP III na idade de 180 dias, após ser submetida à cura úmida por 7 dias.

# 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o preparo das misturas e da realização dos ensaios para determinar as propriedades macroscópicas e microscópicas do concreto, são apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises.

Foram analisados todos os resultados obtidos na seguinte ordem: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção capilar, permeabilidade ao ar e grau de hidratação, todos em um intervalo de confiança de 95%.

As tabelas com os resultados de todos os ensaios realizados encontram-se no Anexo B.

### 6.1 Compressão axial

A resistência à compressão axial foi feita nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias para todas as amostras. O resultado apresentado corresponde a média aritmética de cinco corpos-de-prova para cada idade. Para a realização do ensaio, seguiu-se procedimento da NBR 5739/94 (ABNT, 1994).

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 estão apresentados os resultados da resistência à compressão axial dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS, respectivamente.



Figura 6.1 - Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP III.



Figura 6.2 - Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP V ARI - RS.



Figura 6.3 - Resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o CP V ARI - PLUS.

No cimento Portland de alto-forno (Figura 6.1), a resistência do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 18,4 MPa, representando 43% da resistência aos 28 dias. Aos três dias o valor da resistência foi praticamente igual para os dois tipos de cura e após essa data a resistência à compressão axial dos concretos curados termicamente foi sempre menor do que aqueles curados em imersão durante sete dias. Aos 180 dias a cura térmica apresenta uma perda de 30% em relação à cura úmida realizada por sete dias.

No CP V ARI – RS (Figura 6.2), a resistência do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 34,6 MPa, representando 82% da resistência aos 28 dias. Aos três dias, as resistências foram praticamente iguais e após essa idade a resistência à compressão axial dos concretos submetidos à cura térmica foi sempre menor do que a cura úmida por sete dias. Comparando os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 16% em relação à cura úmida por sete dias. Na idade de 28 dias houve uma diminuição na resistência devido a problemas no adensamento das amostras durante a moldagem.

Para o CP V ARI – PLUS (Figura 6.3), a resistência do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 42,0 MPa, representando 76% da resistência aos 28 dias. Assim como nos outros tipos de cimento, aos três dias as resistências foram

praticamente iguais, e após essa idade a resistência à compressão axial dos concretos submetidos à cura térmica foi sempre menor do que a cura úmida por sete dias. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 12%, mostrando a menor perda entre os tipos de cimento analisados.

Comparando os três tipos de cimento na cura úmida por 7 dias, a resistência à compressão do cimento de alto-forno foi sempre menor do que dos outros cimentos; porém, aos 180 dias sua resistência foi equivalente a dos outros cimentos (Figura 6.4). Na cura térmica, o cimento de alto-forno foi o que obteve a menor resistência em todas as idades, enquanto que as resistências obtidas com o uso do RS e de PLUS foram similares (Figura 6.5).



Figura 6.4 - Resistência à compressão axial dos concretos submetido à cura úmida por 7 dias.



Figura 6.5 - Resistência à compressão axial dos concretos submetido à cura térmica.

### 6.2 Tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi analisada nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias para as todas as amostras curadas termicamente e aos 3, 7, 28, 90 e 180 dias para as amostras submetidas à cura úmida por 7 dias. O resultado corresponde à média de dois corpos-de-prova para cada idade, seguindo o procedimento da NBR 7222/82 (ABNT, 1982).

Nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 estão apresentados os resultados da resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS, respectivamente.



Figura 6.6 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP III.



Figura 6.7 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP V ARI - RS.


Figura 6.8 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com o CP V ARI - PLUS.

No cimento Portland de alto-forno (Figura 6.6), a resistência à tração na compressão diametral do concreto curado térmicamente a 1 dia foi de 2,0 MPa, representando 59% da resistência aos 28 dias. Aos três dias, as resistências foram praticamente iguais e após essa idade a resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos à cura térmica foi sempre menor do que a cura úmida por sete dias. Comparando os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 21%.

Para o CPV ARI – RS (Figura 6.7), a resistência à tração na compressão diametral do concreto curado térmicamente a 1 dia foi de 3,2 MPa, representando 89% da resistência aos 28 dias. Aos três dias as resistências foram praticamente iguais, e após essa idade, a resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos à cura térmica foi sempre menor do que a cura úmida por sete dias. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 26%.

No CPV ARI – PLUS (Figura 6.8), a resistência à tração na compressão diametral do concreto curado térmicamente a 1 dia foi de 3,9 MPa, representando 89% da resistência aos 28 dias, e aos três dias as resistências apresentaram o mesmo

resultado. Após essa idade a cura térmica foi sempre menor do que a cura úmida por sete dias. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos à cura térmica apresentou uma perda de 8%, mostrando-se a menor perda entre os tipos de cimento analisados, assim como na resistência à compressão axial.

Comparando os três tipos de cimento, na cura úmida por 7 dias, o CP III nas idades de 3 e 7 dias apresentou uma resistência inferior aos outros cimentos. Porém aos 180 dias a resistência foi semelhante à do CPV RS. (Figura 6.9). Na cura térmica com um dia a resistência do CP III foi bem inferior a dos outros cimentos. Porém, aos 180 dias as resistências dos três tipos de cimento foram iguais (Figura 6.10), dentro de um intervalo de confiança de 95%.



Figura 6.9 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos a cura úmida.



Figura 6.10 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos submetidos a cura térmica.

#### 6.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi obtido nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias para as amostras submetidas à cura térmica, e aos 3, 7, 28, 90 e 180 dias para as amostras submetidas à cura úmida por 7 dias. Foram utilizados dois corpos-de-prova para cada idade, seguindo o procedimento da NBR 8522/94 (ABNT, 1994). Para a realização deste ensaio, foram utilizados extensômetros elétricos, com os valores das deformações sendo automaticamente reconhecidos por uma placa aquisitora de dados ligada a um computador.

Nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 estão apresentados os resultados do módulo de elasticidade do CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS, respectivamente.

As diminuições no valor do módulo podem ser explicadas pelo fato dos corposde-prova do mesmo cimento, nas idades de 28 dias, 90 e 180 dias não terem sido moldados no mesmo dia, devido ao número restrito de fôrmas e capacidade da câmara de cura térmica.



Figura 6.11 - Módulo de elasticidade do CP III.



Figura 6.12 - Módulo de elasticidade do CP V ARI - RS.



Figura 6.13 - Módulo de elasticidade do CP V ARI - PLUS.

No cimento Portland de alto-forno (Figura 6.11), o módulo de elasticidade do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 28,2 GPa, representando 79% do módulo de elasticidade aos 28 dias. Depois desse período, o módulo de elasticidade das amostras submetidas à cura térmica foi sempre inferior ao de cura úmida. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 10%.

Para o CPV ARI – RS (Figura 6.12), o módulo de elasticidade do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 31,4 GPa, o que representou 92% do módulo aos 28 dias. Depois dessa idade, o módulo de elasticidade das amostras submetidas à cura térmica foi sempre inferior ao de cura úmida. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 15%.

No CPV ARI – PLUS (Figura 6.13), o módulo de elasticidade do concreto curado termicamente a 1 dia foi de 32,9 GPa, o maior entre os cimentos utilizados, representando 88% do módulo de elasticidade aos 28 dias. Nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias o módulo de elasticidade das amostras submetidas à cura térmica foi inferior ao módulo de elasticidade das amostras submetidas à cura térmica foi inferior dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou uma perda de 7%, a menor

perda entre os três tipos de cimentos, assim como na resistência à compressão axial e na tração por compressão diametral.

Comparando-se o módulo de elasticidade entre os tipos de cimento observouse que, com a cura térmica em apenas 24 horas, os resultados variaram entre 79%, e 92% do módulo de elasticidade aos 28 dias. Na cura úmida por 7 dias, o CP III e o CP V ARI - RS apresentaram um crescimento após os 90 dias, e na cura térmica todos os cimentos apresentaram uma perda após os 90 dias (Figura 6.14 e 6.15).



Figura 6.14 - Módulo de elasticidade dos concretos submetidos a cura úmida por 7 dias.



Figura 6.15 - Módulo de elasticidade dos concretos submetidos à cura térmica.

#### 6.4 Absorção capilar

A absorção capilar foi avaliada nas idades de 28, 90 e 180 dias, para todos os tipos de cura, sendo utilizados quatro corpos-de-prova para cada idade, seguindo as recomendações prescritas por Massat (1991).

Nas Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 encontram-se os resultados da absorção capilar (k) dos concretos produzidos com CP III, nas idades de 28, 90 e 180 dias, respectivamente.



Figura 6.16 - Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP III.



Figura 6.17 - Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP III.



Figura 6.18 - Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP III.

A absorção capilar (k) em relação à massa de água absorvida na primeira hora, das amostras produzidas com CP III, submetidas à cura térmica, foi maior do que na cura úmida nas idades de 28 e 90 dias. Aos 180 dias essa absorção foi igual para os dois tipos de cura.

Quanto à ascensão capilar (s) durante 24 horas, para amostras confeccionadas com o CP III, a cura úmida apresentou uma ascensão capilar menor do que a cura térmica em todas as idades (Figura 6.19).



Figura 6.19 - Ascensão capilar (s) do concreto com CP III.

Nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 estão apresentados os resultados da absorção capilar dos concretos produzidos com CP V ARI – RS, nas idades de 28, 90 e 180 dias.



Figura 6.20 - Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP V ARI - RS.



Figura 6.21 - Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP V ARI - RS.



Figura 6.22 - Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP V ARI - RS.

No CPV ARI - RS, a absorção capilar (k) das amostras submetidas à cura térmica foi maior do que a cura úmida, aos 180 dias a absorção foi praticamente igual para os dois tipos de cura.

Quanto à ascensão capilar (k) durante 24 horas, a cura úmida apresentou uma diminuição na ascensão capilar (s) em relação à cura térmica em todas as idades (Figura 6.23).



Figura 6.23 - Ascensão capilar (s) do concreto com CP V ARI - RS.

Nas Figuras 6.24, 6.25 e 6.26 estão apresentados os resultados da absorção capilar dos concretos produzidos com CP V ARI – PLUS, nas idades de 28, 90 e 180 dias.



Figura 6.24 - Absorção capilar aos 28 dias do concreto com CP V ARI - PLUS.



Figura 6.25 - Absorção capilar aos 90 dias do concreto com CP V ARI - PLUS.



Figura 6.26 - Absorção capilar aos 180 dias do concreto com CP V ARI - PLUS.

A absorção capilar (k) das amostras com CPV ARI – PLUS submetidas à cura térmica foi maior do que a cura úmida em todas as idades.

Na cura úmida por 7 dias a ascensão capilar (s) durante 24 horas, foi menor do que a ascensão capilar (s) das amostras submetidas à cura térmica (Figura 6.27).



Figura 6.27 - Ascensão capilar (s) do concreto com CP V ARI - PLUS.

Comparando-se os três tipos de cimento, na idade de 28 dias para as amostras submetidas à cura úmida por 7 dias, o cimento que teve os melhores resultados na absorção capilar (k) foi o cimento CP V ARI – PLUS e o pior foi o CPV ARI - RS, e aos 90 dias e 180 dias todos os cimentos apresentam valores semelhantes. Já na ascensão capilar (s) aos 28 dias os três cimentos apresentam valores próximos, e aos 180 dias o CP III apresentou a menor ascensão capilar (s), indicando um maior tamanho dos poros (Anexo C).

Para a absorção capilar (k), na cura térmica aos 28 dias o melhor cimento, assim como na cura úmida por 7 dias, foi o ARI - PLUS, e o pior foi o cimento Portland de alto-forno. A absorção capilar (k) dos cimentos com adição de escória de alto-forno, quando submetidos à cura térmica, melhorou com o tempo, o que não ocorrou com o cimento sem adição. Na ascensão capilar (s), o melhor desempenho em todas as idades ficou com o CP III, indicando que a cura térmica, nesse caso, beneficiou o CP III (Anexo C).

> UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

#### 6.5 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar foi avaliada nas idades de 28, 90 e 180 dias para todas as amostras. Foram utilizados dois corpos-de-prova para cada idade, e cada corpo-deprova foi ensaiado duas vezes.

Nas Figuras 6.28, 6.29 e 6.30 estão apresentados os resultados da permeabilidade ao ar ao longo do tempo dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS.



Figura 6.28 - Permeabilidade ao ar do concreto com CP III.



Figura 6.29 - Permeabilidade ao ar do concreto com CP V ARI - RS.



Figura 6.30 - Permeabilidade ao ar do concreto com CP V ARI - PLUS.

A permeabilidade ao ar das amostras com CP III submetidas à cura térmica foi muito maior do que aquelas submetidas à cura úmida (Figura 6.28). A cura úmida apresentou valores baixos de permeabilidade, além de mostrar uma evolução muito pequena dos 28 até os 180 dias. Na cura térmica houve um aumento de seis vezes na permeabilidade ao ar de 28 até os 180 dias. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou um aumento trinta e seis vezes maior do que a cura úmida por sete dias, indicando que a cura térmica aumenta muito o tamanho médio dos poros, além de torná-los mais interconectados, isso no CP III.

No CPV ARI – RS, houve um grande aumento na permeabilidade ao ar das amostras submetidas à cura térmica em relação à cura úmida (Figura 6.29). A cura úmida também apresentou valores baixos de permeabilidade ao ar. As amostras submetidas à cura térmica apresentaram uma permeabilidade ao ar maior do que a cura úmida por sete dias e aos 180 dias essa diferença foi quatro vezes maior.

Para o CPV ARI – PLUS, a permeabilidade ao ar das amostras submetidas à cura térmica também foi sempre maior do que na cura úmida (Figura 6.30). As amostras submetidas à cura úmida tiveram uma evolução pequena dos 28 até os 180 dias. Para as amostras submetidas à cura térmica houve um aumento de cinco vezes na permeabilidade de 28 até os 180 dias. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou um aumento de quase cinco vezes na permeabilidade ao ar, em relação às amostras submetidas à cura úmida à cura úmida por 7 dias.

Ao se comparar os três tipos de cimento observou-se que na cura úmida por 7 dias, a permeabilidade aumentou com o tempo, porém os resultados foram baixos para todos os tipos de cimento e para todas as idades. Aos 28 dias, o que apresentou a menor permeabilidade foi o CPV ARI - PLUS, enquanto que, aos 180 dias foi o cimento de alto-forno (Figura 6.31). Quanto à cura térmica, ela realmente teve grande influência na permeabilidade ao ar do concreto, aumentando muito a permeabilidade ao ar. Em todas as idades a menor permeabilidade foi a do CPV ARI - PLUS. Porém, nas idades de 90 e 180 dias, o CPV ARI - RS forneceu resultados próximos aos do CPV ARI - PLUS. O CP III foi o mais prejudicado e aos 180 dias sua permeabilidade foi seis vezes maior do que a dos outros cimentos (Figura 6.32), indicando que a cura térmica aumentou o tamanho médio dos poros, além de torná-los mais interconectados.



Figura 6.31 - Permeabilidade ao ar do concreto submetido à cura úmida por 7 dias.



Figura 6.32 - Permeabilidade ao ar do concreto submetido à cura térmica.

#### 6.6 Grau de hidratação

O grau de hidratação foi medido nas idades de 28, 90 e 180 dias. Foram analisadas seções polidas retiradas do centro e também da superfície do corpo-deprova (até 2 cm da face). O resultado do grau de hidratação foi uma média de no mínimo, 10 imagens das seções polidas. O cálculo foi feito seguindo o procedimento proposto por Mouret (1997).

No Anexo D encontram-se as imagens de cada tipo de cimento submetido aos dois tipos de cura, nas idades de 28, 90 e 180 dias. Apresentam-se os respectivos valores de área de grãos anidros, área de agregados, grau de hidratação para a imagem em questão, e o grau de hidratação obtido pela média de dez imagens.

Nas Figuras 6.33, 6.34 e 6.35 estão apresentados os resultados do grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS ao longo do tempo.



Figura 6.33 - Grau de hidratação do centro do concreto com CP III.



Figura 6.34 - Grau de hidratação do centro do concreto com CP V ARI - RS.



Figura 6.35 - Grau de hidratação do centro do concreto com CP V ARI - PLUS.

No cimento Portland de alto-forno (Figura 6.33), o grau de hidratação das amostras submetidas à cura térmica foi maior do que na cura úmida. Na cura úmida notou-se uma evolução do grau de hidratação maior do que na cura térmica de 28 para 180 dias. Comparando os dois tipos de cura, aos 180 dias a cura térmica apresentou no grau de hidratação um aumento de 10% em relação as amostras submetidas à cura térmica.

Para o CPV ARI – PLUS (Figura 6.35), na cura úmida o grau de hidratação aos 28 e aos 90 dias foi praticamente o mesmo, havendo um ligeiro aumento para a idade de 180 dias. Na cura térmica houve um pequeno aumento no grau de hidratação no período de 28 até 90 dias; após essa data, o grau de hidratação foi o mesmo. Comparando-se os dois tipos de cura, aos 28 dias a cura térmica apresentou um grau de hidratação menor do que aos 90 e 180 dias, os quais foram praticamente iguais.

Comparando-se os tipos de cimento, o grau de hidratação do cimento de altoforno foi sempre menor do que o dos outros tipos de cimento, devido ao maior teor de escória (53%). O CPV ARI - PLUS sempre apresentou o maior grau de hidratação devido à sua maior finura e à ausência de escória; e o grau de hidratação do CPV ARI -RS esteve sempre entre os dois outros tipos de cimento, porém sempre mais próximo do ARI - PLUS, devido ao médio teor de escória (27%) e da finura também elevada. As comparações entre os cimentos submetidos à cura úmida por 7 dias estão mostradas na Figura 6.36, e a cura térmica na Figura 6.37.



Figura 6.36 - Grau de hidratação do centro do concreto submetido à cura úmida por 7 dias.



Figura 6.37 - Grau de hidratação do centro do concreto submetido à cura térmica.

Quando se comparou o grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície dos corpos-de-prova não houve uma grande diferença. Para o CP III, o grau de hidratação foi um pouco inferior na superfície para os dois tipos de cura, indicando ocorrer uma secagem de fora para dentro (Figura 6.38). No CPV ARI - RS e CP V ARI – PLUS o grau de hidratação da superfície na cura úmida por 7 dias foi semelhante ao do centro (Figura 6.39) e (Figura 6.40).



Figura 6.38 - Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o concreto produzido com CP III.



Figura 6.39 - Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o concreto produzido com CP V ARI - RS.



Figura 6.40 - Comparação do grau de hidratação de seções polidas do centro e da superfície para o concreto produzido com CP V ARI - PLUS.

# 6.7 Comparação dos resultados de resistência à compressão axial e grau de hidratação

Utilizando os resultados obtidos de resistência à compressão axial e do grau de hidratação construiu-se alguns gráficos, nos quais foram adicionadas linhas de tendência para estimar o comportamento dessas características.

Para a execução da linha de tendência foram utilizados os valores obtidos experimentalmente mais o ponto (0,0), pois no instante em que o cimento é misturado com a água, o grau de hidratação é zero, bem como a resistência à compressão. Impondo esse ponto inicial (0,0) e utilizando os valores obtidos, a linha de tendência que obteve o comportamento mais satisfatório foi uma reta, pois se comportou melhor do que tendências polinomiais, logarítmicas e exponenciais.

Nas Figuras 6.41, 6.42 e 6.43 estão apresentados os gráficos com as linhas de tendência para a comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente.



Figura 6.41 - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland de alto-forno.



Figura 6.42 - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - RS.



Figura 6.43 - Comparação da resistência à compressão axial com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS.

Analisando-se as linhas de tendência para todos os cimentos, o mesmo grau de hidratação indicou uma resistência à compressão menor para os concretos curados termicamente. Isso ocorreu pois a estrutura interna é mais desordenada e apresenta mais vazios.

Para os cimentos ARI, a inclinação das linhas de cura térmica foi a mesma, e para o CP III essa inclinação foi maior, indicando que para um mesmo grau de hidratação, sua resistência à compressão sempre será um pouco menor do que os outros dois tipos de cura, devido a maior quantidade de poros formados na hidratação deste cimento. Já para a cura úmida durante 7 dias, a tendência foi a de que para um mesmo grau de hidratação, quanto maior o teor de escória no cimento, maior será a resistência à compressão, indicando que os produtos de hidratação da escória apresentam uma estrutura mais ordenada, o que melhora a resistência.

## 6.8 Comparação dos resultados de resistência à tração por compressão diametral e grau de hidratação

Nas Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 estão apresentados os gráficos com a comparação entre a resistência à tração por compressão diametral e o grau de hidratação dos concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno, cimento Portland ARI - RS e cimento Portland ARI – PLUS, respectivamente.

Analisando-se as linhas de tendência para todos os cimentos, a exemplo do que foi feito na resistência à compressão axial, o mesmo grau de hidratação indicou uma menor resistência à tração por compressão diametral para os concretos curados termicamente.

Para os cimentos CP V ARI – RS, CP V ARI – PLUS e CP III, a inclinação das linhas de tendência da amostras submetidas à cura térmica foi praticamente a mesma, indicando que para uma mesmo grau de hidratação a resistência à tração por compressão diametral será a mesma para os três tipos de cimento, num intervalo de confiança de 95%. Já para a cura úmida durante 7 dias, para um mesmo grau de hidratação, quanto maior o teor de escória do cimento, maior será a resistência à compressão diametral, indicando que a cura térmica beneficia mais os produtos de hidratação da escória, apresentando uma estrutura mais ordenada do que o cimento sem adição de escória.



Figura 6.44 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland de alto forno.



Figura 6.45 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - RS.



Figura 6.46 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS.

## 6.9 Comparação dos resultados de módulo de elasticidade e grau de hidratação

Nas Figuras 6.47, 6.48 e 6.49 estão apresentados os gráficos com as linhas de tendência para a comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno, cimento Portland ARI - RS e cimento Portland ARI – PLUS, respectivamente.

Analisando-se as linhas de tendência para todos os cimentos, assim como nos casos da resistência à compressão axial e diametral, o mesmo grau de hidratação indicou um módulo de elasticidade menor para os concretos curados termicamente.

Entre os cimentos, tanto na cura térmica, como na cura úmida por 7 dias, a inclinação das linhas foi menor quanto maior foi o teor de escória, indicando que para

um mesmo grau de hidratação, quanto maior o teor de escória no cimento, maior será o valor de módulo de elasticidade, analisando as tendências.



Figura 6.47 - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland de alto-forno.



Figura 6.48 - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - RS.

U N I C A M P BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE



Figura 6.49 - Comparação do módulo de elasticidade com o grau de hidratação dos concretos produzidos com o cimento Portland ARI - PLUS.

## 6.10 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e grau de hidratação

Na Figura 6.50 está apresentado o resultado da comparação da permeabilidade ao ar com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência logarítmicas, pois foram as que melhor se adaptaram para esse caso.

Para os concretos curados termicamente, não foi possível obter uma correlação entre a permeabilidade ao ar e o grau de hidratação.

Os cimentos ARI mostraram curvas de tendência semelhantes, e para um mesmo grau de hidratação, a permeabilidade ao ar do CP V ARI - RS foi sempre maior do que o CP V ARI – PLUS, indicando que a hidratação da escória aumenta a

### **UNICAMP** BIBLIOTECA CENTRAL SEÇÃO CIRCULANTE

quantidade de poros na matriz. O CP III apresentou uma tendência diferente dos outros cimentos, na qual, a partir de 90 dias, a permeabilidade aumentou muito mesmo com um pequeno aumento no grau de hidratação, não sendo possível adicionar uma linha de tendência, a exemplo do que foi observado para os cimentos ARI.



Figura 6.50 - Comparação da permeabilidade ao ar com o grau de hidratação dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias.

# 6.11 Comparação dos resultados de absorção capilar (k) e grau de hidratação

Na Figura 6.51 está apresentado o resultado da comparação da absorção capilar (k) com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram obtidas de tendência logarítmicas, pois foram as que melhor se adaptaram para esse caso.

Para os concretos curados termicamente, não foi possível obter uma correlação entre a absorção capilar (k) e o grau de hidratação.

Os três tipos de cimento apresentaram curvas de tendência semelhantes e, para um mesmo grau de hidratação, a absorção capilar (k) do CP V ARI - PLUS foi sempre menor do que a dos outros cimentos; a absorção do CP III foi sempre maior, indicando que o aumento no grau de hidratação aumentou a quantidade de vazios nos cimentos com adição de escória.



Figura 6.51 - Comparação da absorção capilar (k) com o grau de hidratação dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias.

# 6.12 Comparação dos resultados de ascensão capilar (s) e grau de hidratação

Nas Figuras 6.52, 6.53 e 6.54 estão apresentados os resultados das comparações da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência logarítmicas, pois foram as que melhor se adaptaram para esse caso.

As tendências para o cimento CP III, seriam linhas praticamente horizontais após 90 días, indicando que para os dois tipos de cura a ascensão aumentaria muito para pequenos aumentos de grau de hidratação.

Para os cimentos ARI, independentemente do tipo de cura, a evolução do grau de hidratação preencheu mais os poros, tornando as estruturas similares.



Figura 6.52 - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP III.



Figura 6.53 - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP V ARI - RS.



Figura 6.54 - Comparação da ascensão capilar (s) com o grau de hidratação dos concretos produzidos com CP V ARI - PLUS.

## 6.13 Comparação dos resultados de grau de hidratação do centro e superfície do concreto

Nas Figuras 6.55, 6.56 e 6.57 estão apresentados os resultados das comparações do grau de hidratação do centro e da superfície dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência lineares, pois foram as que melhor se adaptaram para esse caso.

Analisando as linhas de tendência para o cimento CP III, notou-se que o grau de hidratação da superfície, para o caso da cura térmica, foi inferior ao grau de hidratação do centro do corpo-de-prova, indicando que ocorreu a secagem do corpo-deprova de fora para dentro.

Para os cimentos ARI, devido a maior velocidade de hidratação, o grau de hidratação do centro e da superfície foi praticamente o mesmo.



Figura 6.55 - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos produzidos com CP III.



Figura 6.56 - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos produzidos com CP V ARI - RS.



Figura 6.57 - Comparação do grau de hidratação do centro e da extremidade dos concretos produzidos com CP V ARI - PLUS.
# 6.14 Comparação dos resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Nas Figuras 6.58, 6.59 e 6.60 estão apresentados os resultados das comparações entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência lineares, pois foram as que melhor se adaptaram para esse caso.

Analisando-se as linhas de tendência para os três tipos de cimento, para uma mesma resistência à compressão axial, os concretos curados termicamente apresentaram um módulo de elasticidade menor do que aqueles submetidos à cura úmida por 7 dias. Para o CP III, o aumento da temperatura de cura modificou mais sua microestrutura do que para os cimentos ARI, por isso a redução no CP III foi maior.



Figura 6.58 - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos concretos produzidos com CP III.



Figura 6.59 - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos concretos produzidos com CP V ARI - RS.



Figura 6.60 - Comparação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos concretos produzidos com CP V ARI - PLUS.

# 6.15 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e ascensão capilar (s)

Na Figura 6.61 está apresentado o resultado da comparação entre a permeabilidade ao ar e a ascensão capilar (s) dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI – PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência logarítmicas.

Para os concretos curados termicamente, não foi possível obter uma correlação entre a permeabilidade ao ar e a absorção capilar (s).

Analisando-se as linhas de tendência para os três tipos de cimento, para uma mesma permeabilidade ao ar, quanto menor foi o teor de escória no cimento, maior foi a ascensão capilar (s) em altura de água, pois há um refinamento dos poros., No caso do CP III, o aumento da permeabilidade ao ar aumentou muito o tamanho dos poros, reduzindo a ascensão capilar.



Figura 6.61 - Comparação da permeabilidade ao ar e ascensão capilar (s) dos concretos produzidos com CP V ARI - PLUS.

# 6.16 Comparação dos resultados de permeabilidade ao ar e absorção capilar (k)

Na Figura 6.62 está apresentado o resultado da comparação entre a permeabilidade ao ar e a absorção capilar de água (k) dos concretos produzidos com CP III, CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS, respectivamente. Com os resultados obtidos foram formadas linhas de tendência logarítmicas.

Para os concretos curados termicamente, não foi possível obter uma correlação entre a permeabilidade ao ar e a absorção capilar (k).

Analisando-se as linhas de tendência para os três tipos de cimento, o aumento da permeabilidade ao ar aumentou a absorção capilar (k) para todos os cimentos. O aumento da permeabilidade ao ar indicou um aumento no tamanho dos poros, aumentando a absorção capilar de água em massa (k), principalmente para o CP III, que naturalmente já apresenta uma estrutura interna com mais vazios.



Figura 6.62 - Comparação da permeabilidade ao ar e absorção capilar (k) dos concretos produzidos com CP V ARI - PLUS.

#### 6.17 Imagens da microfissuração

Nas Figuras 6.63 e 6.64, 6.65 e 6.66, 6.67 e 6.68 apresentam-se as imagens microscópicas com a microfissuração das seções polidas do centro dos corpos-deprova dos concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno, cimento Portland ARI - RS e cimento Portland ARI – PLUS, submetidos à cura úmida por 7 dias e cura térmica, respectivamente.

As imagens da microfissuração foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura utilizando o detector de elétrons retroespalhados. A ampliação utilizada foi de 200 X, com uma distância de trabalho de 15 mm, voltagem de 20 kV e *spotsize* (largura do feixe) igual a 50. É importante ressaltar que todas as amostras foram submetidas ao vácuo do microscópio, além disso o processo de preparação, etapa de corte e polimentos, também pode criar e aumentar as microfissuras,

Da imagem original obtida ao microscópio, selecionou-se apenas as regiões mais escuras da imagem, que são os vazios e microfissuras e, com isso, pôde-se calcular a área dessa região em relação à área total da imagem. Essas imagens têm aproximadamente 0,5 mm de altura por 0,7 mm de comprimento.

Analisando-se estas imagens, os menores poros apresentaram dimensão aproximada de 0,1  $\mu$ m e os maiores de 20  $\mu$ m, sendo todos caracterizados como sendo poros capilares. As microfissuras apresentaram espessura máxima aproximada de 2,5  $\mu$ m.

Em todos os casos, foi observado que as microfissuras tenderam a contornar os agregados, confirmando que essa é uma região com mais vazios. Em geral, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram uma maior quantidade de vazios e microfissuras (regiões mais escuras) do que aqueles submetidos à cura úmida por 7 dias.

127



Figura 6.63 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP III submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1%.



Figura 6.64 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP III submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 2%.



Figura 6.65 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - RS submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,2%.



Figura 6.66 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - RS submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 1,8%.



Figura 6.67 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - PLUS submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,5%.



Figura 6.68 - Fissuração aos 180 dias do centro do concreto produzido com CP V ARI - PLUS submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 1,6%.

Nas Figuras 6.69 e 6.70, 6.71 e 6.72, 6.73 e 6.74 apresentam-se as imagens microscópicas com a microfissuração das seções polidas da superfície dos corpos-deprova dos concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno, cimento Portland ARI - RS e cimento Portland ARI – PLUS, submetidos à cura úmida por 7 dias e cura térmica, respectivamente.

As características de preparo e observação ao MEV das imagens da superfície foram as mesmas daquelas para as imagens do centro.

Assim como nas seções polidas do centro dos corpos-de-prova, em todos os casos foi observado que as microfissuras tenderam a contornar os agregados, confirmando que se trata de uma região com mais vazios. Nestas imagens os poros também se apresentaram no intervalo de 0,1  $\mu$ m até 20  $\mu$ m, sendo caracterizados como poros capilares; as microfissuras também apresentaram espessura máxima aproximada de 2,5  $\mu$ m.

Em geral, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram uma maior quantidade de poros e microfissuras do que aqueles submetidos à cura úmida por 7 dias.

Comparando-se as imagens do centro com as da superfície, notou-se que as imagens da superfície apresentaram uma maior área de vazios (regiões mais escuras), confirmando que o concreto dessa região apresentou mais vazios do que a amostra correspondente ao centro.

131



Figura 6.69 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP III submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,5%.



Figura 6.70 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP III submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 2,8%.



Figura 6.71 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - RS submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,6%.



Figura 6.72 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - RS submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 2,2%.



Figura 6.73 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - PLUS submetido à cura úmida por 7 dias. Área de vazios desta imagem igual a 1,3%.



Figura 6.74 - Fissuração aos 180 dias da extremidade do concreto produzido com CP V ARI - PLUS submetido à cura térmica. Área de vazios desta imagem igual a 1,9%.

# 6.18 Relação entre as imagens da microfissuração e o grau de hidratação

O grau de hidratação, para as misturas utilizadas neste trabalho experimental, estimado seguiu a metodologia proposta por Mouret (1997), tanto para as seções polidas do centro como da superfície dos corpos-de-prova, independentemente do tipo de cura adotado.

Analisando-se os resultados dos graus de hidratação obtidos, percebeu-se que para o cimento Portland de alto-forno houve uma diferença significativa entre os resultados do centro e da extremidade, o que não aconteceu para os cimentos CP V ARI - RS e CP V ARI - PLUS, cujos resultados foram praticamente iguais.

A microfissuração foi observada de maneira qualitativa para todos os cimentos e tipos de cura. Em todos os casos as amostras da superfície apresentaram uma maior quantidade de vazios do que as amostras originárias do centro.

Na metodologia proposta por Mouret (1997), as imagens são analisadas com apenas três fases, que são os grãos anidros, agregados e produtos de hidratação, sem levar em conta uma quarta fase, a de vazios. Nesta metodologia, os vazios acabam sendo incluídos na fase de produtos de hidratação, independentemente da sua quantidade, o que pode ser significativo quando são comparados tipos de cura e regiões do corpo-de-prova.

Talvez por esse motivo, o grau de hidratação entre os tipos de cura e regiões do corpo-de-prova acabou sendo semelhante em alguns casos, não refletindo a real diferença entre as amostras, o que sugere uma atualização do método proposto por Mouret (1997), incluindo essa quarta fase.

135

### 7 CONCLUSÕES

Após a apresentação dos resultados e as respectivas discussões algumas conclusões puderam ser extraídas.

- Para a cura úmida por 7 dias, a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade dos concretos aos 180 dias foi praticamente os mesmos, independentemente do tipo de cimento utilizado.
- Para os cimentos empregados no trabalho, a cura térmica piorou o desempenho mecânico do concreto, a partir dos 7 dias. Esse resultado confirma que concretos curados termicamente apresentam uma estrutura menos uniforme, com mais vazios.
- Quando foram submetidos à cura úmida por 7 dias, a absorção capilar dos concretos produzidos com os três cimentos foi semelhante. Na cura térmica, a absorção capilar, em massa de água, dos concretos de cimentos com adição de escória de alto-forno melhorou com o tempo, o que não ocorreu com o cimento sem adição, resultados também observados pela literatura.
- A cura úmida por 7 dias propiciou uma baixa permeabilidade ao ar para os concretos produzidos com os três tipos de cimento, em todas as idades. Na cura térmica, a permeabilidade ao ar foi maior para todos os concretos, aumentando a quantidade dos vazios presentes na matriz.

- Na análise de imagens, observou-se que quanto maior foi o teor de escória adicionada ao cimento, menor foi o grau de hidratação, devido à reatividade da escória, isto é, como a hidratação da escória é mais lenta e precisa de um ambiente adequado para que essa reação ocorra, isto acontece lentamente e em prazo mais longo.
- Ainda na análise de imagens, a microfissuração observada foi maior para os concretos curados termicamente; além disso, a superfície dos corpos-de-prova também apresentou uma maior microfissuração do que o centro, causada pela diferença de umidade.
- A aplicação da cura térmica no concreto produzido com cimento Portland de altoforno proporcionou um aumento no grau de hidratação em todas as idades comparativamente à cura úmida por 7 dias, porque a temperatura de cura é um ativador da escória, aumentando sua reatividade. Para os cimentos ARI o grau de hidratação se manteve constante, indicando que a cura térmica não teve influência nas idades analisadas, devido à maior reatividade proporcionada pela finura destes cimentos.
- No cimento Portland de alto-forno, o grau de hidratação da superfície do corpo-deprova foi sempre menor do que do centro, devido à diferença de umidade que ocorre da superfície para o interior do corpo-de-prova. Para os cimentos ARI, o grau de hidratação da superfície e do centro foi semelhante, não diferiu ao nível de significância de 95%, pois esses cimentos são mais finos, com uma reação de hidratação mais rápida durante o período de cura.
- Apesar de o concreto de cimento Portland de alto-forno sempre possuir um grau de hidratação menor do que o do concreto produzido com os outros cimentos, quando submetido à cura úmida por 7 dias nas idades de 90 e 180 dias, todas as suas características são muito semelhantes às dos outros cimentos, confirmando a melhor estrutura dos produtos de hidratação formados pela hidratação da escória.

## 8 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

- Com a comprovação do bom desempenho dos cimentos com adição de escória de alto-forno, as pesquisas nessa área deveriam prosseguir, observando os resultados mecânicos e a microestrutura do concreto.
- A cura térmica deve continuar sendo objetivo de estudos, usando também ciclos de cura com temperaturas mais elevadas, até 80 °C, e com ciclos mais longos.
- Avaliar a evolução da hidratação nos concretos produzidos com diferentes tipos de cimento em baixas idades.
- Sempre que for possível a microscopia eletrônica de varredura deve ser usada para avaliar as caracterísitcas microscópicas do concreto bem como os métodos matemáticos para análise de imagens, havendo assim um maior intercâmbio entre as unidades de pesquisa.
- Sugere-se, também, uma atualização do método para estimar o grau de hidratação proposto por Mouret (1997), levando-se em conta os vazios presentes na fase de produtos de hidratação. Além disso, deve-se comparar o método para estimar o grau de hidratação com o auxílio da análise de imagens com outros métodos, como por exemplo, a perda ao fogo ou termogravimetria.

### 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação (NBR 7211/83). Rio de Janeiro, 1983.
- 2 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio (NBR 7222/94). Rio de Janeiro, 1994.
- 3 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação (NBR 5733/91). Rio de Janeiro, 1991.
- 4 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland composto – Especificação (NBR 11578/91). Rio de Janeiro, 1991.
- 5 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland de alto-forno – Especificação (NBR 5735/91). Rio de Janeiro, 1991.
- 6 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – Método de ensaio (NBR 5739/94). Rio de Janeiro, 1994.

- 7 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223/92). Rio de
- 8 ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão deformação (NBR 8522/84). Rio de Janeiro, 1984.
- 9 ANDRADE, N. P. H.; VEIGA, F. N. Microscopia Eletrônica de Varredura. Goiânia, Furnas Centrais Elétricas S. A., 1998.
- 10 AITCIN, P. C. High-Performance Concrete. In: 4° CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 1996, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, SP, 1995. 634p. p.55-84.
- 11 ASH, J. E.;HALL, M. G.; LANGFORD, J. I.;MELLAS, M. Estimations of Degree of Hydration of Portland Cement Pastes. Cement and Concrete Research, USA, v. 23, n.2, p. 399-406, 1993.
- 12 ASH, J. E.;MELLAS, M. Application of Backscattered Electron Imaging to Concrete Materials. Cement and Concrete Research, USA, v. 23, n.2, p. 576-580, 1993.
- 13 BALAYSSAC, J. P. Relations Entre Performances Mecaniques, Microestructure et Durabilité des Bétons. Tese de Doutorado, INSA-UPS. Toulouse, 1992.
- 14 BRETON, D., CARLES-GIBERGUES, A., BALLIVY G., GRANDET, J. Contribution to the Formation Mechanism of the Transition Zone Between Rock-Cement Paste. Cement and Concrete Research, USA, v. 23, n.2, p. 335-346, Mar., 1993.

- 15 CAMARINI, G., CINCOTTO, M. A. Cura Acelerada de Argamassas e Concretos por agentes Térmicos – Aspectos Gerais. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DOS PRÉ-MOLDADOS E AUTOCONSTRUÇÃO, 1995, São Paulo, SP. Anais... São Paulo, SP, 1995. 457p. p.111-124.
- 16 CAMARINI, Gladis. Desempenho de Misturas de Cimento Portland e Escória de Alto Forno submetidas à Cura térmica. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, USP, 1995.
- 17 CAMARINI, G. Cura Térmica: Características do Início de Hidratação dos Cimentos com Escória. In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 1996, São Paulo, SP. Anais... São Paulo, SP, 1996. 634p. p.120-155.
- 18 GASTALDINI, A L. G. Influência das Adições Minerais na Porosidade das Pastas de Cimento Portland. In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO 1996, São Paulo, SP. Anais... São Paulo, SP, 1996. 634p. p.171-198.
- 19 HELENE, P., TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Pini, 1995. 349p.
- 20 JAIN, M. K. e PAL, S. C. Utilization of Industrial Slag Making High Performance Concrete. The Indian Concrete Journal. New Jersey, USA, v. 72, n. 6, p. 17-25, Jun., 1998.
- 21 JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. Hydration of Portland Cement. In: BARNES, P., Structure and Performance of Cements. Applied Science Publishers LTD, England, 1983.

- 22 KLELLSEN, K. O., ATLASSI, E. H. X-Ray microanalysis of hydrated cement: Is the analysis total related to porosity?. Cement and Concrete Research, USA, v. 28, n. 2, p. 161-165, Feb. 1998.
- 23 KLEMM, W. A. Cementitious Materials: Historical Notes. In: SKALNY, J. P.
   Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989.
   473p.
- 24 LEA, F. M. The Chemistry of Cement and Concrete. London, 3<sup>a</sup>. ed, Ed. Arnold, 1970.
- 25 MASSAT, M. Caracterisation de la microfissuration, de la permeabilité et de la diffusion d'un béton: application au stockage des déchêts radioactifs. Toulouse, INSA-UPS, 1991. Tese de Doutorado, INSA-UPS. Toulouse, 1991.
- 26 MEHTA, P. K.; M., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Pini. 1994. 573p.
- 27 MINDESS, S. Interfaces in Concrete. SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.

28 MINDESS, S., YOUNG, J. F. Concrete. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 671p.

29 MOURET, M., BASCOUL, A., ESCADELLAS, G. Study of the Degree of Hydration of Concrete by Means of Image Analysis and Chemically Bound Water. **Advanced Cement Based Materials**, New York, USA, v. 27, n. 12, p. 1851-1859, Nov., 1997.

30 NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. São Paulo: Pini, 1982. 738p.

- 31 OLLIVIER, J. P. A Non Destructive Procedure to Observe the Microcracks of Concrete by Scanning Electron Microscopy. Cement and Concrete Research, Vol. 15, N.º 6, Nov., 1985.
- 32 PATEL, H. H.; BLAND, C. H.; POOLE, A. B. The microstructure of concrete cured at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, N.º 3, April, 1995.
- 33 SALOMON L.; HELENE, P. Cura: Como, Quando e Por quê. **Téchne**, N.º 4, Jan/Fev, 1996.
- 34 SCRIVENER, K. L. The Microstructure of Concrete. em SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.
- 35 SILVA,Isac José. Contribuição ao Estudo dos Conctretos de Elevado Desempenho com Adição de Sílica Ativa: Propriedades Mecânicas, Durabilidade e Características da Microestrutura. São Carlos: Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade de São Paulo, 2000. Tese (Doutorado) – EESC, USP, 2000.
- 36 SILVA, Maristela. A Influência da Temperatura na Hidratação dos Cimentos de Escória de Alto-Forno. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, USP, 1998.
- 37 SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.
- 38 TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. London, 2ª ed. Ed. Academic Press, 1992.

## ANEXOS

#### Anexo A - Preparação das amostras para análise ao MEV

Neste anexo está apresentada a seqüência de preparação das seções polidas de concreto.

Em geral, a qualidade das imagens obtidas é resultado da associação da competência do operador, dos equipamentos e do sucesso na preparação da amostra.

As seções polidas de concreto endurecido foram preparadas no Laboratório de Laminação de Rochas do Instituto de Geociências da Unicamp. As amostras de concreto foram preparadas de maneira semelhante às amostras de rochas.

Com uma serra diamantada policorte refrigerada com água foi retirada uma fatia central do corpo-de-prova 10X20 cm. O diâmetro do disco é de 18 polegadas, desta maneira, o disco corta o corpo-de-prova de uma vez só (Figura 1). Nesta fatia central é marcada onde serão retiradas as amostras (Figura 2), depois desse corte a amostra fica com tamanho aproximado de um cubo de 2,0 cm de lado. Em seguida, as amostras são cortadas em uma outra serra diamantada de 6 polegadas, ficando com o tamanho aproximado de 2,0 cm de largura e 0,8 cm de altura.



Figura 1 - Detalhe do corpo-de-prova posicionado para o corte inicial.



Figura 2 - Corpo-de-prova cortado e marcação do próximo corte.

Depois do corte, as amostras são impregnadas a frio com uma resina, para preencher a estrutura dos poros, preservando-os durante o polimento. Essa resina é formada por dois componentes, o primeiro é a Araldite GY e o segundo é o endurecedor HY951, esses componentes são misturados num frasco com relação de 3:1, ou seja três partes de resina e uma parte de endurecedor. As características da resina são: transparência, boa adesão, baixa viscosidade e não presença de retração. Após 24 horas começa o polimento, primeiro com carbeto de silício nº. 320, durante 5 minutos numa politriz com 150 rpm (Figura 3), depois com carbeto de silício nº. 600, mais fino, durante 5 minutos em outra politriz com 150 rpm (Figura 4).



Figura 3 - Polimento durante 5 minutos com carbeto de silício nº. 320.



Figura 4 - Polimento durante 5 minutos com carbeto de silício nº. 600.

Após essa primeira parte do polimento, inicia-se um polimento mais refinado com pastas diamantadas. Na Figura 5 é mostrado as amostras sem resina, as pastas diamantadas e o lubrificante. A primeira pasta, com granulometria de 7  $\mu$ m (Figura 6), é aplicado um lubrificante próprio (Figura 7) e o polimento dura 30 minutos em uma politriz com 200 rpm num disco apropriado (Figura 8). Depois de cada polimento a amostra é lavada para não contaminar o disco de polimento da próxima pasta. A segunda pasta, com granulometria de 3  $\mu$ m, também com lubrificante, durante 30 minutos com 200 rpm na mesma politriz, porém com outro disco para polimento (Figura 9). E a última pasta, com granulometria de 1  $\mu$ m, também com lubrificante, durante 30 minutos com 200 rpm na mesma politriz, porém com outro disco para polimento (Figura 9). E a última pasta, com granulometria de 1  $\mu$ m, também com lubrificante, durante 30 minutos com 200 rpm na mesma politriz, porém com outro disco para polimento (Figura 10).



Figura 5 - Detalhe das amostras ainda sem resina, pastas diamantadas e do lubrificante.



Figura 6 - Aplicação da pasta diamantada de 7 µm.



Figura 7 - Aplicação do lubrificante sobre a pasta diamantada de 7  $\mu m.$ 



Figura 8 - Polimento da amostra com a pasta diamantada de 7  $\mu$ m durante 30 minutos.



Figura 9 - Polimento da amostra com a pasta diamantada de 3  $\mu$ m durante 30 minutos.



Figura 10 - Polimento da amostra com a pasta diamantada de 1 µm durante 30 minutos.

Depois do polimento as amostras passam num equipamento de ultrassom durante 5 minutos ou são aplicados jatos de ar para retirar o resíduo de pasta diamantada na superfície, obtendo-se, assim, as amostras planas, lisas e com aspecto brilhante.

No Laboratório de Microscopia Eletronica (LME), do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (LNLS), são feitas as imagens utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura JSM 5900 LV. Inicialmente, as amostras são metalizadas com um filme de ouro no equipamento chamado Sputter Coater (Figura 11), a amostra permanece na câmara de metalização do aparelho durante 60 segundos com uma corrente de 40 mA, resultando num filme de aproximadamente 16 nm de espessura (Figura 12). Depois a amostra é levada ao microscópio eletrônico para as observações e obtenções das imagens para estudo (Figura 13).



Figura 11 - Aparelho para a metalização da amostra.



Figura 12 - Amostra de concreto metalizada, pronta para ir ao MEV.



Figura 13 - Observação da amostra metalizada no MEV.

#### Anexo B - Resultados dos ensaios

Neste anexo estão apresentadas as tabelas com resultados de todos os ensaios realizados.

| (********* | Cura térmica (MPa) |
|------------|--------------------|
|            | 18,4               |
| 27,1       | 28,8               |
| 42,2       | 34,5               |
| 51,0       | 43,2               |
| 60,7       | 43,6               |
| 67,4       | 48,4               |
|            | 67,4               |

 Tabela 1 - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento Portland de alto-forno.

| Idade (dias)             | Cura úmida 7dias (MPa) | Cura térmica (MPa) |
|--------------------------|------------------------|--------------------|
| 1                        |                        | 34,6               |
| 3                        | 44,3                   | 42,9               |
| 7                        | 60,3                   | 48,9               |
| 28                       | 53,0                   | 42,3               |
| 90                       | 70,7                   | 61,1               |
| 180                      | 72,3                   | 60,9               |
| Cx = 5%; Dp = 3,8 MPa; I | IC = 95%.              |                    |

Tabela 2 - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento ARI - RS.

| Idade (dias)           | Cura úmida 7dias (MPa) | Cura térmica (MPa) |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| 1                      |                        | 42                 |
| 3                      | 48,3                   | 47,4               |
| 7                      | 54,3                   | 50,4               |
| 28                     | 65,3                   | 55,0               |
| 90                     | 74,7                   | 63,0               |
| 180                    | 67,9                   | 59,8               |
| Cx = 5%; Dp = 3,8 MPa; | IC = 95%.              |                    |

Tabela 3 - Valores da resistência à compressão dos concretos produzidos com o cimento ARI - PLUS.

 Tabela 4 - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o cimento

 Portland de alto-forno.

| Idade (dias)                    | Cura úmida 7dias (MPa) | Cura térmica (MPa) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| 1                               | -                      | 2,0                |
| 3                               | 3,1                    | 3,2                |
| 7                               | 3,5                    | 3,2                |
| 28                              | 4,5                    | 3,4                |
| 90                              | 4,7                    | 3,4                |
| 180                             | 5,6                    | 4,4                |
| Cx = 6%; Dp = 0,3 MPa; IC = 95% |                        |                    |

 Tabela 5 - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o cimento

 ARI - RS.

| Idade (dias)              | Cura úmida 7dias (MPa) | Cura térmica (MPa)                    |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1                         | <u></u>                | 3,2                                   |
| 3                         | 3,6                    | 3,3                                   |
| 7                         | 4,4                    | 3,4                                   |
| 28                        | 4,5                    | 3,6                                   |
| 90                        | 5,0                    | 4,5                                   |
| 180                       | 5,7                    | 4,2                                   |
| Cx = 6%; Dp = 0,3 MPa; IC | = 95%.                 | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |

| Cura úmida 7dias (MPa) | Cura térmica (MPa)   |
|------------------------|--|
|                        | 3,9  |
| 4,1                    | 4,1  |
| 4,7                    | 4,2  |
| 4,7                    | 4,4  |
| 5,6                    | 4,5  |
| 5.0                    | 4.6  |
|                        | Cura úmida 7dias (MPa)<br>-<br>4,1<br>4,7<br>4,7<br>5,6<br>5,0 |

 
 Tabela 6 - Valores da resistência à compressão diametral dos concretos produzidos com o cimento ARI - PLUS.

Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade do cimento Portland de alto-forno.

| Idade (dias)             | Cura úmida 7dias(GPa) | Cura térmica (GPa) |
|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1                        |                       | 28,2               |
| 3                        | 32,2                  | <b>-</b> ·         |
| 7                        | 35,8                  | 32,8               |
| 28                       | 38,0                  | 35,9               |
| 90                       | 38,1                  | 36,0               |
| 180                      | 38,6                  | 34,5               |
| Cx = 6%; Dp = 3,0 GPa; I | C = 95%.              |                    |

| Tabela 8 - Valores do módulo de elasticidade do cimento ARI - R |
|---|
|---|

| Idade (dias)              | Cura úmida 7dias (GPa) | Cura térmica (GPa) |
|---------------------------|------------------------|--------------------|
| 1                         |                        | 31,4               |
| 3                         | 33,5                   | -                  |
| 7                         | 34,3                   | 33,1               |
| 28                        | 36,4                   | 34,2               |
| 90                        | 39,9                   | 37,8               |
| 180                       | 41,4                   | 35,1               |
| Cx = 6%; Dp = 3,0 GPa; IC | <b>) = 95%</b> .       |                    |

| Idade (dias)           | Cura úmida 7dias (GPa) | Cura térmica (GPa) |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| 1                      |                        | 32,9               |
| 3                      | 38,6                   | -                  |
| 7                      | 39,6                   | 37,1               |
| 28                     | 41,9                   | 37,6               |
| 90                     | 41,9                   | 37,0               |
| 180                    | 38,0                   | 35,2               |
| Cx = 6%; Dp = 3.0 GPa; | IC = 95%.              |                    |

Tabela 9 - Valores do módulo de elasticidade do cimento ARI - PLUS.

Tabela 10 - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland de alto-forno.

| Idade (dias)           | Cura úmida 7dias                           | Cura térmica                               |
|------------------------|--|--|
|                        | (kg.s/m <sup>2</sup> )(x10 <sup>-3</sup> ) | (kg.s/m <sup>2</sup> )(x10 <sup>-3</sup> ) |
| 28                     | 4,6  | 8,4  |
| 90                     | 4,7  | 6,4  |
| 180                    | 7,1  | 5,9  |
| Cx = 7%; Dp = 0,001 kg | .s/m²; IC = 95%.                           | ***************************************    |

Tabela 11 - Valores da absorção capilar (s) do concreto com cimento Portland de alto-forno.

| Idade (dias)                       | Cura úmida 7 dias                         | Cura térmica                              |
|------------------------------------|---|---|
|                                    | (m/s <sup>0.5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) | (m/s <sup>0,5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) |
| 28                                 | 3,2                                       | 4,3                                       |
| 90                                 | 3,4                                       | 4,9                                       |
| 180                                | 3,3                                       | 4,5                                       |
| Cx = 7%; Dp = 0,1 m/s <sup>0</sup> | <sup>5</sup> ; IC = 95%.                  |   |

| ldade (dias) | Cura úmida 7 dias<br>(kg.s/m²)(x10 <sup>-3</sup> ) | Cura térmica<br>(kg.s/m²)(x10 <sup>-3</sup> ) |
|--------------|--|---|
|              |  |   |
| 90           | 5,1  | 5,9   |
| 180          | 6,4  | 6,2   |

Tabela 12 - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland ARI - RS.

Tabela 13 - Valores da absorção capilar (s) do concreto com cimento Portland ARI - RS.

| Idade (dias)                         | Cura úmida 7 dias<br>(m/s <sup>0,5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) | Cura térmica<br>(m/s <sup>0,5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) |
|--------------------------------------|--|---|
|                                      |  |   |
| 90                                   | 4,9  | 7,3   |
| 180                                  | 4,7  | 7,0   |
| Cx = 7%; Dp = 0,1 m/s <sup>0,5</sup> | ; IC = 95%.  |   |

Tabela 14 - Valores da absorção capilar (k) do concreto com cimento Portland ARI - PLUS.

| Idade (dias) | Cura úmida 7 dias<br>(kg.s/m²)(x10 <sup>-3</sup> ) | Cura térmica<br>(kg.s/m²)(x10 <sup>-3</sup> ) |
|--------------|--|---|
|              |  |   |
| 90           | 5,5  | 6,1   |
| 180          | 6,7  | 7,6   |

| Idade (dias)                           | Cura úmida 7 dias<br>(m/s <sup>0,5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) | Cura térmica<br>(m/s <sup>0,5</sup> )(x10 <sup>-5</sup> ) |
|--|--|---|
|  |  |   |
| 90                                     | 5,1  | 6,2   |
| 180                                    | 7,6  | 7,1   |
| Cx = 7%; Dp = 0,1 m/s <sup>0,5</sup> ; | ; IC = 95%.  |   |

| Idade (dias)                          | Cura úmida 7 dias                      | Cura térmica                            |
|---------------------------------------|--|---|
|                                       | (m <sup>2</sup> )(x10 <sup>-19</sup> ) | (m <sup>2</sup> ) (x10 <sup>-19</sup> ) |
| 28                                    | 1,46                                   | 9,10                                    |
| 90                                    | 1,50                                   | 24,90                                   |
| 180                                   | 1,60                                   | 60,70                                   |
| Cx = 15%; Dp = 0.05 m <sup>2</sup> (x | 10 <sup>-19</sup> ); IC = 95%.         |   |

Tabela 16 - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento Portland de alto-forno.

Tabela 17 - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento ARI - RS.

| ldade (dias)                          | Cura úmida 7 dias<br>(m <sup>2</sup> ) (x10 <sup>-19</sup> ) | Cura térmica<br>(m <sup>2</sup> ) (x10 <sup>-19</sup> ) |
|---------------------------------------|--|---|
| 28                                    | 1.36   | 18.40   |
| 90                                    | 1,74   | 3,75  |
| 180                                   | 2,40   | 10,50   |
| Cx = 15%; Dp = 0,05 m <sup>2</sup> (x | 10 <sup>-19</sup> ); IC = 95%.                               |   |

Tabela 18 - Valores da permeabilidade ao ar do concreto com cimento ARI - PLUS.

| ldade (dias)                          | Cura úmida 7 dias<br>(m²) (x10 <sup>-19</sup> ) | Cura térmica<br>(m²) (x10 <sup>-19</sup> ) |
|---------------------------------------|---|--|
| 28                                    | 1,21  | 1,77                                       |
| 90                                    | 1,25  | 3,16                                       |
| 180                                   | 1,83  | 9,96                                       |
| Cx = 15%; Dp = 0,05 m <sup>2</sup> (x | 10 <sup>-19</sup> ); IC = 95%.                  |  |

Tabela 19 - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento Portland de alto-forno.

| Idade (dias)            | Cura úmida 7dias(%) | Cura térmica (%) |
|-------------------------|---------------------|------------------|
| 28                      | 56,1                | 66,3             |
| 90                      | 67,0                | 72,7             |
| 180                     | 67,3                | 74,0             |
| Cx = 10%; Dp = 6,0%; IC | = 95%.              |                  |
| Idade (dias)            | Cura úmida 7 dias (%) | Cura térmica (%)<br>73,7 |  |  |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------|--|--|
| 28                      | 75,9                  |                          |  |  |
| 90                      | 81,2                  | 81,8                     |  |  |
| 180                     | 86,3                  | 82,6                     |  |  |
| Cx = 10%; Dp = 6,0%; IC | = 95%.                |                          |  |  |

Tabela 20 - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento ARI - RS.

Tabela 21 - Valores do grau de hidratação do concreto com cimento ARI - PLUS.

| Idade (dias)            | Cura úmida 7 dias (%) | Cura térmica (%) |  |  |
|-------------------------|-----------------------|------------------|--|--|
| 28                      | 87,3                  | 84,9             |  |  |
| 90                      | 88,3                  | 89,5             |  |  |
| 180                     | 92,1                  | 89,0             |  |  |
| Cx = 10%; Dp = 6,0%; IC | = 95%.                |                  |  |  |

Tabela 22 - Grau de hidratação dos concretos obtidos de seções polidas do centro e da extremidade.

| Concreto                       | 28 dias |             | 90 dias |             | 180 dias |             |  |
|--------------------------------|---------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|--|
|                                | Centro  | Extremidade | Centro  | Extremidade | Centro   | Extremidade |  |
| AF 7d                          | 56,1    | 56,6        | 67,0    | 66,0        | 67,3     | 67,2        |  |
| AF T                           | 66,3    | 56,9        | 72,7    | 68,0        | 74,0     | 70,0        |  |
| RS 7d                          | 75,9    | 79,8        | 81,2    | 81,8        | 86,3     | 82,5        |  |
| RS T                           | 73,7    | 75,0        | 81,8    | 81,5        | 82,6     | 88,5        |  |
| PLUS 7d                        | 87,3    | 85,7        | 88,3    | 86,4        | 92,1     | 87,7        |  |
| PLUS T                         | 84,9    | 86,4        | 89,5    | 88,0        | 89,0     | 90,8        |  |
| Cx = 10%; Dp = 6,0%; IC = 95%. |         |             |         |             |          |             |  |

## Anexo C - Gráficos de absorção capilar

Neste anexo estão apresentados apenas os gráficos de absorção capilar (k) do cimento Portland de alto-forno, ARI - RS e o ARI – PLUS, submetidos à cura úmida por 7 dias e cura térmica nas idades de 28, 90 e 180 dias, pois as respectivas análises já foram citadas. Além dos gráficos de absorção capilar (s) dos três tipos de cimento submetidos à cura úmida por 7 dias e cura térmica.







Figura 15 - Absorção capilar dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias aos 90 dias.



Figura 16 - Absorção capilar dos concretos submetidos à cura úmida por 7 dias aos 180 dias.



Figura 17 - Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 28 dias.



Figura 18 - Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 90 días.



Figura 19 - Absorção capilar dos concretos submetidos à cura térmica aos 180 dias.



Figura 20 - Absorção capilar (s) dos concretos submetidos à cura úmida.



Figura 21 - Absorção capilar (s) dos concretos submetidos à cura térmica.

## Anexo D - Imagens analisadas

Neste anexo estão apresentadas algumas imagens originais e as respectivas imagens analisadas com os valores das quantidades de grãos anidros, agregados e o valor do grau de hidratação para a imagem analisada. As imagens apresentadas referem-se aos três tipos de cimento, submetidos aos dois tipos de cura, empregados neste trabalho experimental. Foram analisadas para este estudo aproximadamente 450 imagens de grau de hidratação.



b) Imagem analisada
Figura 22 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno na idade de 28 dias, submetido à cura úmida por 7 dias.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 10,9%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 41,1%
Grau de hidratação desta imagem= 51,3%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 56,1%



b) Imagem analisada Figura 23 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno na idade de 90 dias, submetido à cura úmida por 7 dias. Área de grão anidro (contorno em verde) = 11,3% Área de agregado (contorno em vermelho) = 15,9% Grau de hidratação desta imagem= 64,7%. Grau de hidratação médio deste concreto = 67%



Figura 24 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno na idade de 180 dias, submetido à cura úmida por 7 dias.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 7,6%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 36,8%
Grau de hidratação desta imagem= 68,4%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 67,3%



Figura 25 - Imagens do concreto produzído com cimento Portland de alto-forno na idade de 28 dias, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 8,9%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 22%
Grau de hidratação desta imagem= 70%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 66,3%



Figura 26 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno na idade de 90 días, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 7,8%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 27,3%
Grau de hidratação desta imagem= 71,8%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 72,7%



Figura 27 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland de alto-forno na idade de 180 dias, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 5,4%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 36,6%
Grau de hidratação desta imagem= 77,6%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 74%



Figura 28 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS na idade de 28 días, submetido à cura úmida por 7 días.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 9,1%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 22,5%
Grau de hidratação desta imagem= 68,6%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 75,9%



b) Imagem analisada Figura 29 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI – RS na idade de 90 dias, submetido à cura úmida por 7 dias. Área de grão anidro (contorno em verde) = 4,1% Área de agregado (contorno em vermelho) = 48,6% Grau de hidratação desta imagem= 78,7%. Grau de hidratação médio deste concreto = 81,2%



- b) Imagem analisada
- Figura 30 Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI RS na idade de 180 dias, submetido à cura úmida por 7 dias.
  Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,7%
  Área de agregado (contorno em vermelho) = 30%
  Grau de hidratação desta imagem= 85,9%.
  Grau de hidratação médio deste concreto = 86,3%



Figura 31 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS na idade de 28 dias, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) =7,7%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 18,2%
Grau de hidratação desta imagem= 74,9%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 73,7%



Figura 32 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS na idade de 90 días, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 5,8%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 20,5%
Grau de hidratação desta imagem= 80,5%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 81,8%



Figura 33 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - RS na idade de 180 dias, submetido à cura térmica,
Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,6%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 19,3%
Grau de hidratação desta imagem= 88,1%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 86,2%



Figura 34 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 28 dias, submetido à cura úmida por 7 dias.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,6%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 25,8%
Grau de hidratação desta imagem= 87%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 87,3%



Figura 35 - Imagens do concreto produzído com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 90 dias, submetido à cura úmida por 7 dias.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 4,1%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 16,7%
Grau de hidratação desta imagem= 86,7%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 88,3%



Figura 36 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 180 dias, BIBLIOTECA CENTRE SECAO CIACULAN submetido à cura úmida por 7 dias.

Área de grão anidro (contorno em verde) = 2,3%

Área de agregado (contorno em vermelho) = 27,2%

Grau de hidratação desta imagem= 92,1%.

Grau de hidratação médio deste concreto = 91,6%



Figura 37 - Imagens do concreto produzído com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 28 dias, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,9%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 28,8%
Grau de hidratação desta imagem= 85,2%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 84,9%



Figura 38 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 90 dias, BIBLICA CAMP submetido à cura térmica. Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,6% Área de agregado (contorno em vermelho) = 23,9%

Grau de hidratação desta imagem= 87,2%.

Grau de hidratação médio deste concreto = 89,5%



Figura 39 - Imagens do concreto produzido com cimento Portland ARI - PLUS na idade de 180 dias, submetido à cura térmica.
Área de grão anidro (contorno em verde) = 3,1%
Área de agregado (contorno em vermelho) = 23,2%
Grau de hidratação desta imagem= 89,2%.
Grau de hidratação médio deste concreto = 86,2%

## APÊNDICE

## Apêndice A - Algoritmo utilizado – Software - Matlab

% segmentacao concreto f=imread('XX.jpg'); h=mmhistogram(f); mmshow(f); figure(2);plot(h); disp('imagem e histograma');pause;

% histogram processing hf=mmasf(mmneg(h),'co',mmseline(8,90)); ws=mmwatershed(hf); wsf=mmintersec(mmneg(mmframe(ws,20)),ws); t=find(wsf); x=1:size(h,1); mmax=max(double(h)); plot(x,h,'k',x,mmneg(hf),'r',x,mmgray(ws,'uint16',mmax/2),'b',x,mmgray(wsf,'uint16',mmax),'m');

aux = mmthreshad(f,t,255); anidro=mmareaopen(aux,20); figure(1); mmshow(f,mmgradm(anidro)); disp('fase anidra');pause;

g=mmgradm(f); m=mmregmin(mmhbasin(g,10)); ws=mmcwatershed(g,m);

mmshow(f,ws); disp('segmentacao graos');pause;

%graos grandes aux1=mmareaopen(mmneg(ws),300); aux2=mmareaclose(aux1,50);

aglo=mmsubm(aux2,anidro);

mmshow(f,mmgradm(aglo),mmgradm(anidro));
[w h] = size(f);
nidro\_phase = sum(double(anidro(:)))/(w\*h)
aggr\_phase = sum(double(aglo(:)))/(w\*h)